
BACHELORARBEIT

Herr
Andreas Frei

**Die Übertragung von Musik
und Sprache in geschlossenen
Räumen durch dynamische
Lautsprecher mit nierenförmiger
Richtcharakteristik**

2010

BACHELORARBEIT

Die Übertragung von Musik und Sprache in geschlossenen Räumen durch dynamische Lautsprecher mit nierenförmiger Richtcharakteristik

Autor:
Andreas Frei

Studiengang:
Medientechnik

Seminargruppe:
CK05w1

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Michael Hösel

Zweitprüfer:
Joachim Kiesler

Mittweida, September 2010

Bibliographische Angaben:

Frei, Andreas

Die Übertragung von Musik und Sprache in geschlossenen Räumen durch dynamische Lautsprecher mit nierenförmiger Richtcharakteristik - 2010 - 71 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), University of Applied Sciences,
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2010

Referat:

Diese Arbeit beschreibt den Aufbau des neuartigen Line-Arrays der Firma Musikelectronic Geithain GmbH. Die markanten Bauteile des TS56K werden hier aufgeführt und erläutert. Darüber hinaus wird deren Verwendung erklärt und die Qualitätssteigerung im Klang veranschaulicht. Ein Vergleich mit herkömmlichen Lautsprechertypen zeigt, wo die Vorteile dieser Konstruktion liegen.

Weiterer Kern ist die Dokumentation und Auswertung der Hörtests, welche in zwei verschiedenen Räumen durchgeführt wurden. Ihre akustischen Eigenschaften sind bewusst gewählt, da ein Vergleich beider Ergebnisse die guten Qualitäten des Systems aufzeigen soll.

Danksagung:

Dank Musikelectronic Geithain GmbH hatte ich die Möglichkeit, den Hörtests ihres Line Arrays beizuwohnen. In diesem Sinne bedanke ich mich herzlich bei Herrn Kiesler und seinen Mitarbeitern, die mir bei der Ermittlung, Dokumentation und Analyse der Daten sehr geholfen haben. Dank gilt auch meiner gesamten Familie und meiner Freundin, die mich bei dieser Arbeit und dem langen Studium sehr unterstützt haben.

BACHELORARBEIT

Herr
Andreas Frei

**Die Übertragung von Musik
und Sprache in geschlossenen
Räumen durch dynamische
Lautsprecher mit nierenförmiger
Richtcharakteristik**

2010

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Einleitung.....	XI
1. Grundlagen.....	13
1.1 Allgemeine Informationen zur Arbeit	13
1.2 Einführung in die Akustik.....	15
1.2.1 Schallausbreitung	15
1.2.2 Schallfeld	16
1.3 Schallwahrnehmung.....	19
1.3.1 Aufbau und Funktion des Gehörs	19
1.3.2 Psychoakustische Grundlagen	20
1.4 Wiedergaberaum.....	22
1.4.1 Notwendigkeit der Signalverstärkung.....	22
1.4.2 Der zeitliche Ablauf von Schallereignissen im Raum.....	22
1.4.3 Einfluss von Begrenzungen auf Schallfelder	26
1.4.4 Bewertung von akustischen Raumeigenschaften.....	29
1.5 Schallsender.....	31
1.5.1 Notwendigkeit gerichteter Systeme	31
1.5.2 Elektrodynamische Treiber	31
1.5.3 Gehäuse und Bauweisen	34
1.5.4 Parameter zur Beschreibung von Lautsprechern	38
1.5.5 Lösungen für große Beschallungsflächen	41
2. Testvorbereitungen.....	48
2.1 Das System TS56K von ME-Geithain	48
2.1.1 Aufgaben und Einsatzbereich	48
2.1.2 Aufbau und Funktionsweise	48
2.1.3 Akustische Eigenschaften	51
2.1.4 Unterschiede zu herkömmlichen Line-Arrays	54
2.2 Bewertungsmethoden und Versuchsaufbau	56
2.2.1 Zielsetzung der Tests	56
2.2.2 Akustische Messungen und Methoden.....	56
2.2.3 Allgemeiner Versuchsaufbau	57

3. Testdurchführung.....	58
3.1 Mehrzweckhalle in Geithain	58
3.1.1 Raumeigenschaften.....	58
3.1.2 Versuchsaufbau	60
3.1.3 Versuchsablauf.....	60
3.1.4 Versuchsergebnisse.....	62
3.2 Großer Saal im Gewandhaus Leipzig - Line Array geflogen	63
3.2.1 Raumeigenschaften.....	63
3.2.2 Versuchsaufbau	65
3.2.3 Versuchsablauf.....	65
3.2.4 Versuchsergebnisse.....	66
3.3 Großer Saal im Gewandhaus Leipzig - Line-Array auf der Bühne	68
3.3.1 Raumeigenschaften.....	68
3.3.2 Versuchsaufbau	68
3.3.3 Versuchsablauf.....	70
3.3.4 Versuchsergebnisse.....	70
4. Fazit	72
Literaturverzeichnis.....	74
Anlagenverzeichnis.....	77
Abkürzungsverzeichnis	78
Glossar.....	79
Abbildungen.....	82
Selbständigkeitserklärung.....	86

CD-Verzeichnis

— Hörtest	
— 1_MehrzweckhalleGeithain	
— CAD	
— AutoCAD2007	
— Fotos	
— Quelldaten	

	2_GewandhausLeipzig1
	├─ CAD
	│ └─ AutoCAD2007
	├─ Fotos
	└─ Quelldaten
	3_GewandhausLeipzig2
	├─ CAD
	│ └─ AutoCAD2007
	├─ Fotos
	└─ Quelldaten
	sonstige Abbildungen
	├─ CAD
	└─ Quelldaten
	TS56k
	├─ CAD
	├─ Fotos
	└─ Quelldaten

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.01	Veranschaulichung des Verhältnisses der Schallintensität bei Entfernungsverdopplung.....	17
Abb. 1.02	Isophonenkennlinie.....	19
Abb. 1.03	Hörfläche	21
Abb. 1.04	Zeitlicher Ablauf des Impulsschallfeldes.....	23
Abb. 1.05	Zeitlicher Ablauf des Diffusschallfeldes	24
Abb. 1.06	Hallradius	25
Abb. 1.07	Raummoden	27
Abb. 1.08	Kalottenlautsprecher.....	32
Abb. 1.09	Konuslautsprecher	32
Abb. 1.10	Partialschwingungen	33
Abb. 1.11	Akustischer Kurzschluss.....	34
Abb. 1.12	Geschlossenes Lautsprechergehäuse	35
Abb. 1.13	Bassreflex Lautsprecher	36
Abb. 1.14	Arten der Treiberanordnung	37
Abb. 1.15	Amplituden-Frequenz-Diagramm	38
Abb. 1.16	Polardiagramm.....	39
Abb. 1.17	Isobarendiagramm	40
Abb. 1.18	Schallzeile E 90 MKII von KLING & FREITAG GmbH	42
Abb. 1.19	Richtcharakteristik-Simulation einer Schallzeile	43
Abb. 1.20	Line-Array M'elodie von MEYER SOUND	44
Abb. 1.21	Arten von Waveformern.....	45
Abb. 1.22	Arten von Waveformern.....	46
Abb. 2.01	Lautsprecher TS56K.....	48
Abb. 2.02	Lautsprecher TS56K (links: Rückansicht, rechts: Seitenansicht).....	49
Abb. 2.03	Lautsprecher TS56K (links: Rückansicht, rechts: Seitenansicht).....	50

Abb. 2.04	Freifeld Übertragungsbereich.....	51
Abb. 2.05	Polar diagramm horizontales (oben) und vertikales (unten)	52
Abb. 2.06	Isobarendiagramm horizontal (oben) und vertikal (unten).....	53
Abb. 2.07	TS56K als Line Array mit 6 Elementen und 5° Neigung pro Lautsprecher	55
Abb. 3.01	Versuchsaufbau der Mehrzweckhalle Geithain (Skizze).....	58
Abb. 3.02	Versuchsaufbau der Mehrzweckhalle Geithain (Rendering)	59
Abb. 3.03	Übertragungsverlauf Mehrzweckhalle Geithain	61
Abb. 3.04	Versuchsaufbau Großer Saal - Line-Array geflogen (Skizze)	63
Abb. 3.05	Versuchsaufbau Großer Saal - Line-Array geflogen (Rendering)	64
Abb. 3.06	Übertragungsverlauf Großer Saal - Line-Array geflogen	66
Abb. 3.07	Versuchsaufbau Großer Saal - Line-Array auf der Bühne (Skizze)	68
Abb. 3.08	Versuchsaufbau Großer Saal - Line-Array auf der Bühne (Rendering)	69
Abb. 3.09	Übertragungsverlauf Großer Saal - Line-Array auf der Bühne	70

Einleitung

In der Übertragungskette von Audiosignalen ist der Lautsprecher seit jeher das schwächste Glied. Sein geringer Wirkungsgrad, die komplexen Interaktionen mit seiner Umgebung und viele andere Faktoren erschweren die Konstruktion hochwertiger Quellen. Neue Erkenntnisse über das Verhalten von Schallwellen ermöglichen eine neue Generation von Lautsprechern. Diese so genannten Line-Arrays sind besonders zur effizienten Beschallung von großen Flächen geeignet. Der TS56k von Musikelektronik Geithain basiert auf diesen Grundlagen, verzichtet aber im Gegensatz zu herkömmlichen Modellen auf klangverzerrende Bauelemente. Er wird demnach den hohen Anforderungen der Firma gerecht und setzt im Bereich der Live-Beschallung neue Maßstäbe.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, welche besonderen Eigenschaften der TS56k besitzt und wie diese das Klangbild im Raum beeinflussen. Grundlage zur Beurteilung sind Höreindrücke in verschiedenen Räumen, objektive Messwerte bzw. Daten und ihr Vergleich zu denen herkömmlicher Lautsprecher. Der TS56k soll ein natürliches Klangbild erzeugen, welches auch in schwieriger akustischer Umgebung noch genug Präsenz am Zuhörerplatz liefert. Dazu gehören unter anderem ein linearer Übertragungsbereich und ausreichend Abstand des Direkt- zum Diffusschallpegel. Darüber hinaus wird von dem Lautsprecher eine einfache Handhabbarkeit, robustes und flexibles Design gefordert.

Kurzübersicht

Zur besseren Verständlichkeit soll zuerst das komplexe Thema der Lautsprecher anhand notwendiger Fakten (Absatz 1 "Grundlagen") erklärt werden. Die Aufführung aller notwendigen Details sprengt jedoch den Rahmen dieser Arbeit, weshalb an entsprechenden Stellen auf einschlägige Literatur verwiesen ist. Absatz 2 "Testvorbereitungen" beschäftigt sich anschließend explizit mit dem TS56k. Es wird analysiert, welche Bauteile verwendet wurden und welche Funktion bzw. Auswirkung sie besitzen. Weiterhin wird der Lautsprecher mit herkömmlichen Produkten verglichen. Anhand der Messergebnisse werden dann Voraussagen auf seinen Raumklang getroffen, welche im Absatz 3 "Testdurchführung" schließlich real ermittelt werden. Zudem werden die durchgeführten Testergebnisse analysiert und den Erwartungen gegenübergestellt. Der Absatz 4 "Fazit" greift noch einmal die festgelegten Ziele auf, vergleicht die Räume miteinander und wertet das Erreichen der Ziele aus.

CD-Inhalt

Auf der beigelegten Compact Disc ist eine digitale Version dieser Bachelorarbeit enthalten. Alle Daten die die Tests betreffen sind unter "Hörtest" gespeichert, wobei für jeden Versuch noch ein separates Verzeichnis angelegt ist. Informationen zum hier untersuchten Lautsprecher sind unter "TS56k" zu finden. Darstellungen aus Kapitel 1 und 2 sind im Ordner "sonstige Abbildungen" mit ihrer hier verwendeten Nummerierung angeführt.

Zur besseren Übersicht sind die Dateien noch auf verschiedene Ordner aufgeteilt. "CAD" enthält Dateien, die in AutoCAD 2010 und WYSIWYG R22 erstellt wurden. Zur größeren Kompatibilität ist (unter "AutoCAD2007") jede CAD-Datei noch in der Version 2007 abgespeichert. "Fotos" beinhaltet Bilder, die nicht im Text oder Anhang mit aufgeführt sind. Sofern originale Dateien von ME-Geithain vorhanden sind befinden sich diese im Unterordner "Quelldaten".

1. Grundlagen

1.1 Allgemeine Informationen zur Arbeit

Warum gibt es so wenig Material in diesem Bereich?

Da hier ein Wandlersystem beschrieben wird, das elektronische Signale in akustische umformt, reicht eine Charakterisierung auf Basis von Messwerten nicht aus. Der Klang der Quelle wird nicht nur von deren Eigenschaften und Bauform beeinflusst, sondern auch durch den Wiedergaberaum, in dem sie sich befindet. Somit entstehen teilweise sehr komplexe Abhängigkeiten, die keine allgemein gültigen Aussagen über ein System zulassen. Ändert sich eine der Test-Voraussetzung (z.B. Wiedergaberaum, Position der Quelle bzw. Senke, etc.) führt dies zu einer Veränderung der Hörwahrnehmung bzw. der gemessenen Werte. Die hier erhaltenen Daten sind bis auf wenige Ausnahmen in Verbindung mit dem gesamten System zu betrachten und können nicht ohne weiteres auf andere Wiedergabesituationen übertragen werden.

Messtechnisch ermittelte Werte ermöglichen den Klangcharakter eines Raumes in Zahlen und Kategorien festzuhalten (siehe Punkt 1.4.4). Sie können gezielt durch Absorber, Reflektoren, Diffusoren, etc. beeinflusst werden. Eine sehr gute Raumakustik zu erzeugen gelingt jedoch nur unter großem Aufwand. Zudem lässt sich ein Raum (wie oben schon beschrieben) selbst mit genauen Messmethoden nicht vollständig charakterisieren bzw. beeinflussen.

Spezielle Hörtests für eine subjektive Bewertung von Lautsprechern sind sehr aufwendig und benötigen speziell geschultes Personal. Wie oben schon erwähnt beeinflusst der Raum (bzw. seine akustischen Eigenschaften) den gesamten Klang. Um aussagefähige Ergebnisse zu erhalten ist es daher notwendig, die Quelle an dem Ort zu testen, für den sie konstruiert wurde. Der Aufwand an Personal, Zeit und Geld ist den meisten Herstellern zu groß, weswegen sie sich auf das Messen objektiver Kenngrößen beschränken.

Außerdem ist, besonders im Konsumentenbereich, die Lautsprecheraufstellung bzw. die akustische Raumgestaltung nicht genügend realisierbar. Grund dafür sind vor allem fehlende finanzielle Mittel und ein (aus der Sicht des Konsumenten) zu hoher Aufwand. Doch schon ein geringes Verändern der Lautsprecherposition führt (gemäß Dickreiter¹) zu einer Veränderung besonders im unteren Frequenzbereich. Eine allgemeine Aussage wird deswegen sehr erschwert.

All dies sind Gründe dafür, dass eine tiefgründige Analyse oft zu aufwendig bzw. unmöglich wird. Die Firma Musikelectronic Geithain GmbH hat sich als Ziel gesetzt, die höchsten Höranforderungen zu befriedigen und führt deswegen umfangreiche Tests durch. Geprüft wird der Klangeindruck des Lautsprechers als einzelne Schallquelle als auch in Kombination mit anderen Typen (z.B. dem Basslautsprecher „T300/15“).

1 vgl. Dickreiter, 1997, S. 212f

Grundlegende Fakten der Bachelorarbeit

Einige, im weiteren Text vorausgesetzte Fakten, werden im Folgenden kurz beschrieben.

Für akustische Untersuchungen ist nur der Bereich zwischen 20 Hz bis 20 kHz² interessant. Außerhalb dessen ist es dem menschlichen Gehör nicht möglich Schall wahrzunehmen. Innerhalb davon liegt der sogenannte Hörbereich (siehe [Abb. 1.03](#)). Alle Frequenzen darunter gehören zum Infraschall, darüber liegende zum Ultraschall. Da das Thema Psychoakustik einige Besonderheiten aufweist, soll es im Punkt "1.3 Schallwahrnehmung" noch näher betrachtet werden.

Die allgemeine Akustik beinhaltet die Schallfortpflanzung innerhalb aller möglichen Medien bzw. Aggregatzustände. In dieser Arbeit ist jedoch größtenteils nur das Medium Luft in seiner natürlichen Form bei ca. 20°C von Bedeutung. Alle folgenden Aussagen, sofern nicht anders angegeben, beziehen sich auf diese Voraussetzung und werden stillschweigend angenommen.

2 vgl. Weinzierl, 2008, S. 54f

1.2 Einführung in die Akustik

Es ist zu beachten, dass die hier verwendete Terminologie (von Ivar Veit bzw. Dickreiter) nicht in jeder Literatur identisch ist. Dieser Abschnitt erklärt zwar die allgemeinen Begriffe, auf alle Bezeichnungen kann jedoch nicht eingegangen werden.

1.2.1 Schallausbreitung

Ein schwingender Körper erregt die an ihn angrenzenden Luftteilchen. Geschieht die Schwingung ausreichend schnell, haben die Moleküle keine Möglichkeit die Temperaturänderung (verursacht durch die Kompression der Schwingung) mithilfe von Wärmeleitung auszugleichen und fangen ebenfalls an zu schwingen. Die Teilchen werden aus ihrer Ruhelage gebracht und bewegen sich um ihren Nullpunkt herum. Die Geschwindigkeit der Auslenkung wird Schallschnelle v genannt.

Die resultierenden Luftdruckschwankungen werden als Schalldruck p (Formel 1.01³) bezeichnet. Sie setzen sich aus der Kraft F und Fläche A , auf die die Kraft einwirkt, zusammen. Da beide Größen periodischen Schwankungen unterliegen, gibt man meist nur die Effektivwerte an. Zwischen beiden Größen herrschen häufig Phasenunterschiede. Durch die longitudinale Bewegung der Teilchen breitet sich auch die Energie auf dieser Ebene aus. Zu beachten ist, dass dabei jedoch keine Luftmassen bewegt werden (wie bei Wind oder Strömungen).

$$p = \frac{F}{A} \quad \text{Formel 1.01}$$

Der Schalldruck kann sehr große bzw. kleine Werte erreichen, weshalb der Begriff Schalldruckpegel L_p (Formel 1.02⁴) eingeführt wurde. Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen dem vorhandenen Schalldruck p und einem Referenzdruck p_0 . Verwendet man als Bezugswert die Hörschwelle spricht man vom absoluten Schallpegel, alle anderen bilden den relativen Schallpegel.

$$L_p = 20 \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{dB} \quad \text{Formel 1.02}$$

Wie schnell sich die Schallenergie ändert wird durch die Schallgeschwindigkeit c gekennzeichnet. Verwendet man die allgemein gültigen Werte für Luft bei 20°C erhält man rund 331,6 m/s^{-1 5}.

3 vgl. Wikipedia, Schalldruck, <http://de.wikipedia.org/wiki/Schalldruck>, Datum des Aufrufs 20.08.2010

4 vgl. Dickreiter, 1997, S. 9

5 vgl. Weinzierl, 2008, Formel 1.30

Da die Schallenergie überall im Raum unterschiedlich hoch ist beschränkt sich die Messung der Energie auf ein infinitesimal kleines Volumenelement. Das Ergebnis ist die Schallenergiedichte w (Formel 1.03⁶), die sich in potentielle und kinetische Energie aufteilt. Beide Teile der Formel werden durch Schalldruck p und Schallschnelle v (s. oben) vertreten. Das Ergebnis von w definiert die Leistung, die eine bestimmte Fläche lotrecht durchströmt.

$$w = \underbrace{\frac{p^2}{2\rho_0 c^2}}_{\text{potentielle Energie}} + \underbrace{\frac{\rho_0 v^2}{2}}_{\text{kinetische Energie}} \quad \text{Formel 1.03}$$

Da die Energieabstrahlung einer Quelle schlecht mit dem Schalldruck bzw. -pegel beschrieben werden kann, verwendet man überwiegend den Begriff der Schallleistung. Er beschreibt die gesamte übertragene, gesendete oder empfangene Energie innerhalb einer bestimmten Zeit. Zudem dient er zur Bestimmung der Wirksamkeit von Wandler-Systemen und kann in der Formel für den Wirkungsgrad η (Formel 1.04⁷) zusammengefasst werden. Sie gibt an wie viel der elektrischen Leistung $P_{\text{elektrisch}}$ in akustische $P_{\text{akustisch}}$ umgesetzt wird. Die meisten Treiber (mit Ausnahme von Horngeladenen Systemen) erreichen dabei durchschnittlich nur 1% Wirkungsgrad⁸.

$$\eta = \frac{P_{\text{akustisch}}}{P_{\text{elektrisch}}} \quad \text{Formel 1.04}$$

Eine Ermittlung der akustischen Leistung ist bei Lautsprechern jedoch nahezu unmöglich, weswegen man die Schallintensität eingeführt hat. Sie beschränkt sich auf die Angabe der Leistung des Schalls in einem bestimmten Punkt bzw. Fläche. Zur Angabe der gesamten Schallenergie müssten somit die Schallintensitäten aller Richtungen einer Quelle ermittelt und summiert werden.

1.2.2 Schallfeld

Sendet eine Quelle Schall aus, so bildet sich in ihrer Umgebung ein Schallfeld. Da dieses von vielen Faktoren beeinflusst wird, ist die mathematische Nachbildung einer realen Situation sehr komplex bzw. nicht vollständig möglich. Somit sind nur geometrisch einfache Quellen (Lautsprechermembran, Orgelpfeife, Saite) gut zu beschreiben. Selbst bei diesen muss bereits auf Modelle zurückgegriffen werden, da Effekte wie Partialschwingungen, Veränderungen im Übertragungsmedium, Geometrie und Eigenschaften der Begrenzenden Flächen die Berechnung schnell komplex werden lassen. Allgemein sind die Schallfelder in zwei Bereiche unterteilbar.

6 vgl. Weinzierl, 2008, Formel 1.33

7 vgl. Weinzierl, 2008, Formel 1.34

8 vgl. Weinzierl, 2008, S. 25f

Ebene Welle

Dabei kommt es grundsätzlich auf die Ausdehnung der Quelle an. Ist diese größer als die wiedergegebene Wellenlänge ($h > \lambda$) breitet sich der Schall zuerst in Form einer ebenen Welle aus, Schalldruck und -schnelle liegen in einer Dimension und sind phasengleich. Die Schallintensität nimmt aufgrund der zylindrischen Abstrahlform (siehe Abb. 1.01) nur mit 3 dB ab. Somit verringert sich auch Schalldruck und -schnelle proportional zur Entfernungsverdopplung um diesen Betrag. Ab einem entsprechenden Abstand ähnelt die Schallausbreitung jedoch immer mehr einer Kugelwelle. Ideale Linienschallquellen sind in der Realität jedoch nur selten zu finden.

Kugelwelle

Einzelne Lautsprecher (Line-Arrays ausgenommen) sind eher wie eine punktförmige Quelle konstruiert. Diese erzeugen in ihrem unmittelbaren Umfeld ein kugelförmiges Schallfeld. Ihre Größe ist dabei immer kleiner als die gesendete Wellenlänge ($h < \lambda$). Der Schall breitet sich in konzentrischen Kreisen um den Sender herum aus. Die Intensität nimmt mit $1/r^2$ bei doppelter Entfernung ab. Abb. 1.01 veranschaulicht dieses Verhalten. Wo sich die Abstandsvervielfachung bei einer Linienquelle nur mit Faktor 2 auf die Fläche auswirkt, muss sie bei Punktschallquellen quadriert werden. Effekte wie die Nahbesprechung bei Druckgradienten-Mikrofonen werden dadurch verursacht. Auch eine Ermittlung der Richtcharakteristik von Lautsprechern in diesem Bereich ist nicht möglich.

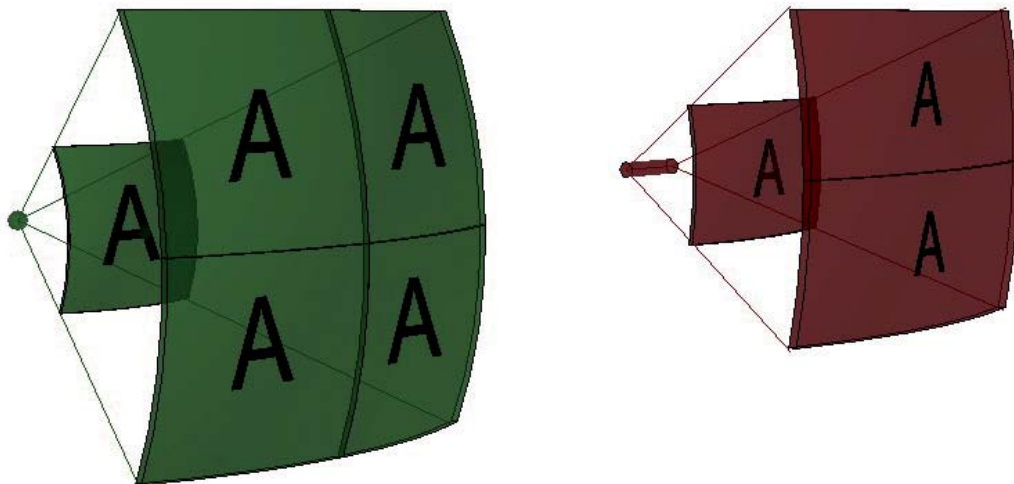


Abb. 1.01 Veranschaulichung des Verhältnisses der Schallintensität bei Entfernungsverdopplung
vgl. Weinzierl, 2008, Abb. 1.15

In größerer Entfernung von der Quelle verliert sich die Krümmung und nähert sich mehr der Form einer ebenen Welle an. Der Übergang von Nahfeld zu Fernfeld ist in der einschlägigen Literatur (Weinzierl, Möser 2005 S.85f., Fasold und Sonntag 1993) ausreichend untersucht. Zwar gibt es verschiedene Varianten der Entfernungsermittlung, da jedoch laut Weinzierl⁹ häufig der vereinfachte Ausdruck $r = \lambda$ verwendet wird, soll dieser auch Grundlage folgender Erläuterungen sein.

9 vgl. Weinzierl, 2008, S. 38

1.3 Schallwahrnehmung

Die menschliche Schallwahrnehmung ist sehr komplex und zudem noch nicht vollständig erforscht. Hier werden nur kurz einige Faktoren (basierend auf Dickreiter und Weinzierl) erklärt, die im Folgenden relevant sind. Für detailliertere Erklärungen bzw. umfangreichere Analysen wird auf einschlägige Fachliteratur verwiesen.

1.3.1 Aufbau und Funktion des Gehörs

Das Ohr wird grundsätzlich in drei Bereiche unterteilt. Die Ohrmuschel, der äußere Gehörgang, sowie das Trommelfell bilden dabei das Außenohr. Sie haben die Funktion, den Schall aufzufangen und weiter zu leiten. Wie jedes Übertragungssystem besitzt auch das Ohr eine frequenzspezifische Empfindlichkeit, die sehr stark durch Ohrmuschel und Gehörgang geprägt ist. Im Mittelohr bewirken die drei Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss und Steigbügel) eine Impedanzanpassung zwischen Luft und der Schneckenflüssigkeit. Darüber hinaus schützen sie das Innenohr vor zu hohem Schalldruck. Die Gehörschnecke und das Gleichgewichtsorgan gehören zum Innenohr. Es bildet den Übergang zwischen physischem Schall und elektrischen Nervensignalen. Die verantwortlichen Vorgänge und Bestandteile sind jedoch zu komplex um sie hier zu beschreiben.

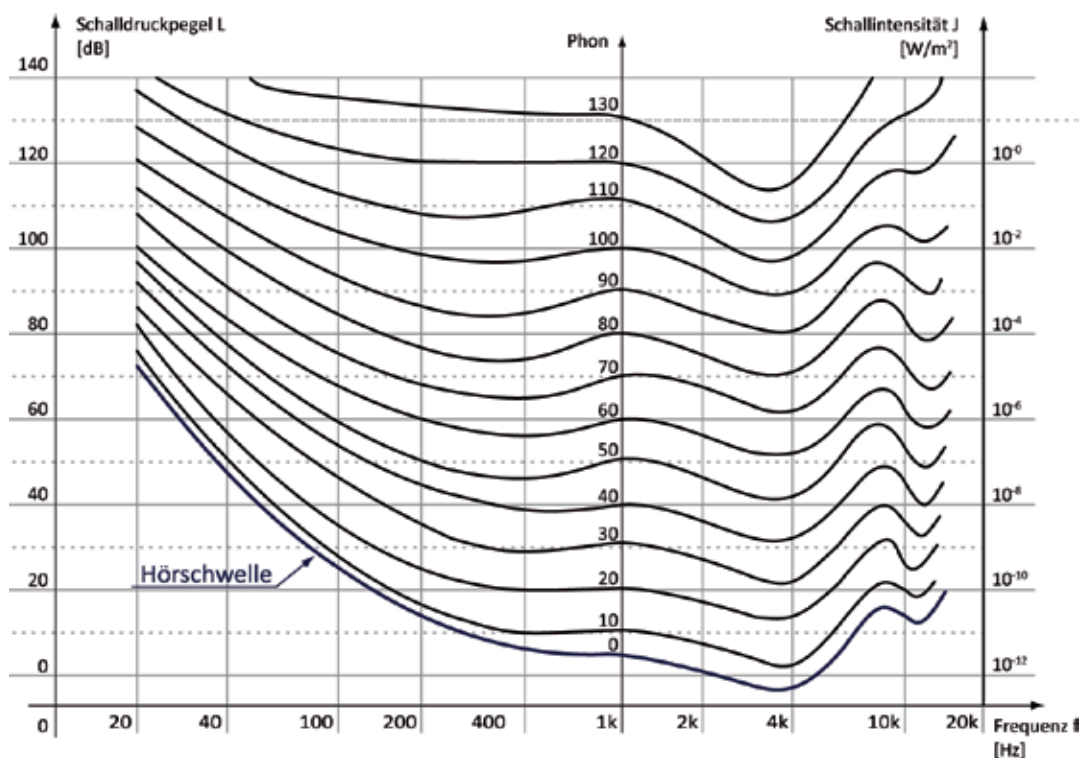


Abb. 1.02 Isophonenkennlinie
vgl. Dickreiter, 1997, Abb. 3/4

1.3.2 Psychoakustische Grundlagen

Intensitätsanalyse

Empirische ermittelte Tests mit Probanden ergaben, dass die subjektive Wahrnehmung von Schall vor allem von der Frequenz abhängig ist. Den Testpersonen wurde ein 1 kHz Ton mit fest definiertem Pegel vorgespielt. Sie sollten den Pegel eines Tons anderer Frequenz so einstellen, dass beide letztlich die gleiche Lautstärke besitzen. Das Ergebnis ist in den Isophonenkennlinien nach ISO 226:2003 festgehalten (siehe Abb. 1.02). Töne, die auf einer der Linien liegen, empfinden wir mit gleicher Lautstärke. Der Verlauf der Kurven zeigt, dass wir für Töne im oberen und unteren Frequenzbereich viel weniger sensibel sind. Außerdem fällt beim Vergleich der Graphen auf, dass diese Unempfindlichkeit bei geringem Schallpegel noch deutlich ausgeprägter ist. Ein Musiksinal was mit einem bestimmten Pegel aufgenommen wurde, muss deshalb mit diesem wiedergegeben werden, ansonsten wird es durch Pegelverzerrungen verfälscht.

Die Hörschwelle und Schmerzgrenze bezeichnen den mini- bzw. maximal wahrnehmbaren Schall. Zusammen mit dem Ultraschall- und Infraschallbereich bilden sie die Begrenzung der Hörfläche (siehe Abb. 1.03). Innerhalb dieses Bereiches kann das Ohr Schall wahrnehmen.

Die Lautheit, umgangssprachlich auch Lautstärke genannt, beschreibt die subjektive Intensität eines Schallereignisses.

Um Beziehungen zwischen verschiedenen Lautheiten herzustellen, wurden viele Versuche unternommen und Methoden entwickelt. Da dieses Verhältnis skalierbar ist, lässt es sich näherungsweise in einer Gleichung festhalten. 1 Sone, festgelegt durch den Psychophysiker S. Stevens, ist dabei der Schalldruck von 40 SPL von einem 1 kHz-Ton. Eine Erhöhung um ein Sone führt zu einer Verdopplung der Lautstärke (+10 dB).

Klanganalyse

Für die Beziehung zwischen Tönen ist nicht der absolute Wert entscheidend, sondern das Verhältnis beider Töne zueinander. So entspricht eine Oktave dem Verhältnis 1:2 (=Frequenzverdopplung) und wird bei 20 zu 40 Hz genauso empfunden wie bei 2.000 zu 4.000 Hz.

Analog zur Intensitätsanalyse der Lautheit wurde die Messgröße Tonheit für das Verhältnis von Tonhöhen zueinander entwickelt, woraus die Mel-Skala hervor ging. Im unteren Frequenzbereich bewirkt eine Verdopplung der Frequenz die doppelte Tonhöhe. Ab 500 Hz löst sich diese Proportionalität auf woraufhin die Skala davon abweicht.

Ein harmonischer Klang beinhaltet als Grundton die tiefste Frequenz. Er beeinflusst die wahrgenommene Tonhöhe des gesamten Klages. Alle weiteren ganzzahligen Vielfachen werden Obertöne genannt. Sie liefern dem Gehör Informationen über die Klangfarbe der Quelle und helfen ihm sie zu Identifizieren

Wird nun mithilfe eines Hochpass-Filters der Grundton aus dem Hörereignis entfernt, bleibt die empfundene Tonhöhe unverändert. Das Gehör nimmt dafür nicht die nächsthöhere Frequenz, sondern bildet ihn aus den Obertönen des Klanges nach. Dieser Effekt wird virtuelle Tonhöhe genannt.

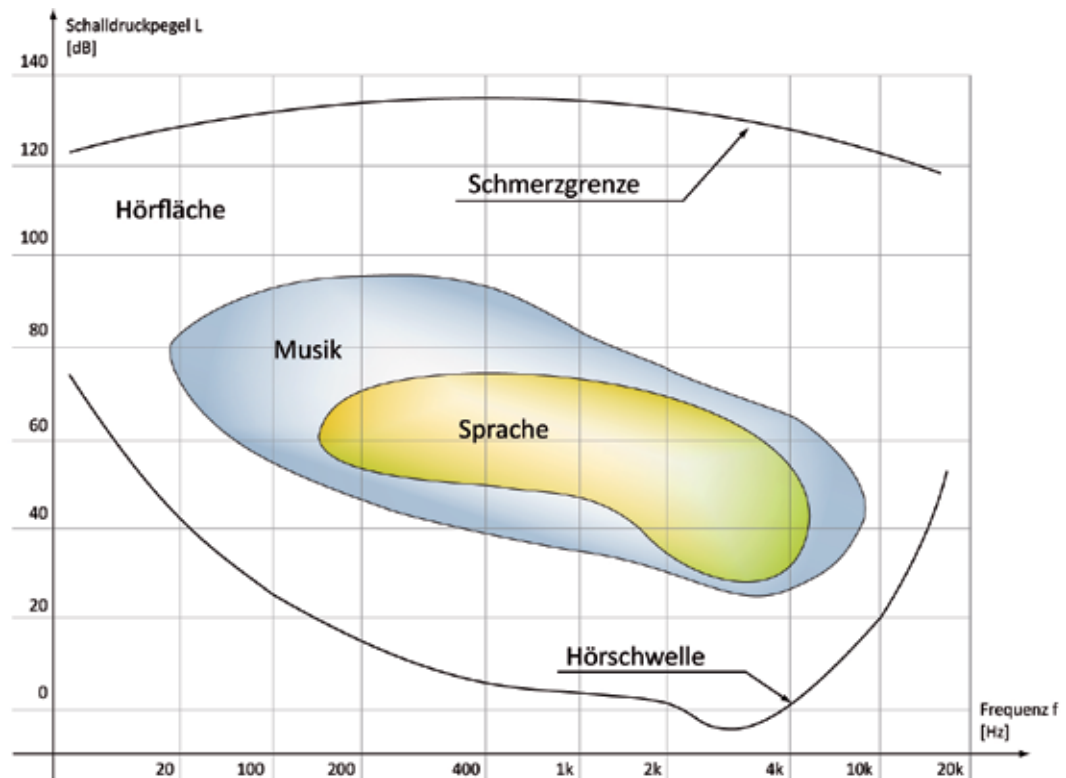


Abb. 1.03 Hörfläche
vgl. Borucki, 1989, Abb. 75

1.4 Wiedergaberaum

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Wechselwirkungen zwischen Schallquelle(n) und Wiedergaberaum.

1.4.1 Notwendigkeit der Signalverstärkung

Oft reicht die Leistung eines Instrumentes nicht aus, um einen großen Raum mit genügend Schall zu versorgen. Anfänglich wurden zur Verstärkung mehrere Instrumente der gleichen Art verwendet, wodurch große Orchester entstanden. Die doppelte Anzahl einer Quelle bewirkt erst bei absoluter Phasengleichheit eine Pegelerhöhung um 3 dB, was nur elektronische Klangerzeuger erreichen. Bei allen anderen Quellen verdichtet bzw. verbreitert sich lediglich das Spektrum des Klangs. In der subjektiven Wahrnehmung wird dies zwar als lauter empfunden, wirkt sich aber messtechnisch nicht aus. Eine elektronische Verstärkung des Signals ist demnach empfehlenswert. Der erhöhte Schalldruckpegel vergrößert den Abstand von Direkt- zu Diffusschall, jedoch nur solange der Raum geeignete akustische Eigenschaften bzw. günstige Abmessungen besitzt. Andernfalls kann man diese durch ein Beschallungssystem künstlich verbessern. Bereiche mit Schallunterversorgung können zum Beispiel durch Stützlautsprecher ausgeglichen werden.

Besonders bei großen Abständen zwischen den einzelnen Künstlern kommt es vor, dass sich die Musiker untereinander schlecht hören. Das Zusammenspiel aller Musiker wird dadurch stark erschwert. Eine Abnahme der entsprechenden Quellen und gezieltes Monitoring kann dem Abhilfe schaffen.

Kaum ein Instrument besitzt eine homogene Schallabstrahlung. Deswegen ist es möglich, durch eine gezielte Mikrofonaufstellung den gewünschten Klanganteil aufzunehmen, zu verstärken und dem Originalsignal (z.B. über Stützlautsprecher) zuzumischen. Liegt der Pegel des künstlich erzeugten Schalls nicht über dem des Originals, bleibt die Lokalisation bzw. Ausdehnung der Schallquelle unverändert.

1.4.2 Der zeitliche Ablauf von Schallereignissen im Raum

Im freien Schallfeld kann sich der Schall ungehindert ausbreiten. Ein Zustand der nur an sehr wenigen Orten vorzufinden ist (z.B. Wüstenebene, spezielle Messräume). In den meisten Fällen wird der Schall an Wänden und Hindernissen reflektiert, gebrochen, gebeugt und teilweise absorbiert. Da die resultierenden Beziehungen sehr komplex sind, reduziert man die Schallausbreitung auf die Hauptabstrahlrichtung (ähnlich dem Lichtstrahlen-Model). Diese Vereinfachung gilt jedoch erst oberhalb der vierfachen Schröderfrequenz.

Impulsschall

Sendet nun eine Quelle einen Impuls aus trifft er mehrfach an der Senke ein. Unabhängig vom Raum lässt sich dabei ein allgemeines Muster erstellen, was den Schall in drei Kategorien einteilt Abb. 1.04.

Der Direktschall erreicht den Empfänger zuerst, da er nicht reflektiert wird und somit die kürzeste Strecke zurücklegt. Er liefert dem Hörer Informationen über die Klangquelle (z.B. Lautstärke, Klangpräsenz, Position der Schallquelle, Einschwingvorgänge und unregelmäßige geräuschhafte Klangkomponenten). Da er an keinen Flächen reflektiert wurde, ist er vom Raum selbst unabhängig.

Die frühen Reflektionen bezeichnen den Schall, welcher nur über ein Hindernis zur Senke gelangt. Deren Auswirkungen auf den Gesamtklang sind abhängig vom zeitlichen Abstand zum Direktsignal. Im Bereich von 0,8 bis 20 ms bewirken sie bei Aufzeichnungen Kammfiltereffekte, die als Klangfärbungen auffallen. Zwischen 20 und 50 ms liefern sie Informationen über die Raumgröße, verstärken zusätzlich den Direktschall und geben Auskunft über die Ausdehnung der Schallquelle. Über 50 ms verursachen sie ein störendes Echo.

Alle nachfolgenden Reflektionen benennt Dickreiter allgemein als Nachhall. Es sind die Schallwellen, die mehrfach im Raum reflektiert werden und somit später an der Senke eintreffen. Sie geben dem Hörer Auskunft über die Beschaffenheit des Raumes bzw. reflektierenden Flächen.

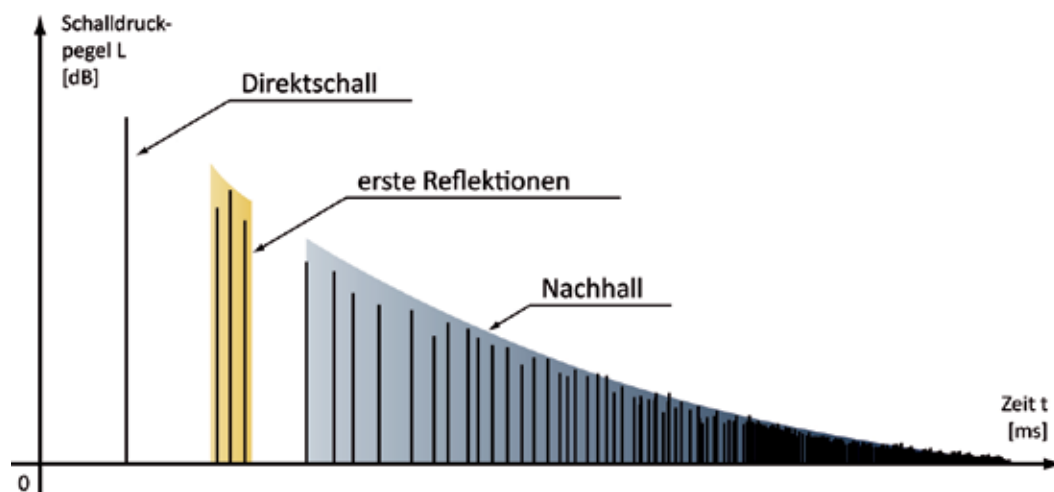


Abb. 1.04 Zeitlicher Ablauf des Impulsschallfeldes
vgl. Dickreiter, 1997, Abb. 1/18

Diffuses Schallfeld

Da eine Quelle nur in seltenen Fällen einzelne, voneinander deutlich getrennte Impulse aussendet, ist auch die Untersuchung bei einem dauerhaften und gleichmäßigen Signal notwendig (siehe Abb. 1.05).

$$L_{diff} = L_P - 10 \log\left(\frac{A}{4m^2}\right) dB \quad \text{Formel 1.05}$$

Die Formel 1.05¹⁰ für das ideale diffuse Schallfeld L_{diff} zeigt, dass es nicht von der Entfernung zur Quelle, sondern von deren Schallleistung P und der äquivalenten Schallabsorptionsfläche A abhängt. Es ist demnach überall im Raum gleich (siehe Abb. 1.06) und beim An- und Abklingen sehr stark bemerkbar. Als Bezugswert für A wurden hier $4m^2$ "offenes Fenster" verwendet. Dieser Begriff beschreibt eine Fläche mit maximalem Absorptionsvermögen, wie es bei einem geöffneten Fenster vorzufinden ist. Zur Charakterisierung des diffusen Schallfeldes wurden folgende Parameter eingeführt:

Beginnt die Quelle mit dem Aussenden des Schalls, baut sich im Raum das diffuse Schallfeld auf. Die Steilheit des Anstiegs sowie seine Klangcharakteristik hängen dabei vom Raum ab (z.B. Anzahl, Größe und Oberflächenbeschaffenheit der reflektierenden Flächen). Dabei ist zu beachten, dass Energiedichte, Schalldruck und -pegel unterschiedlich ansteigen.

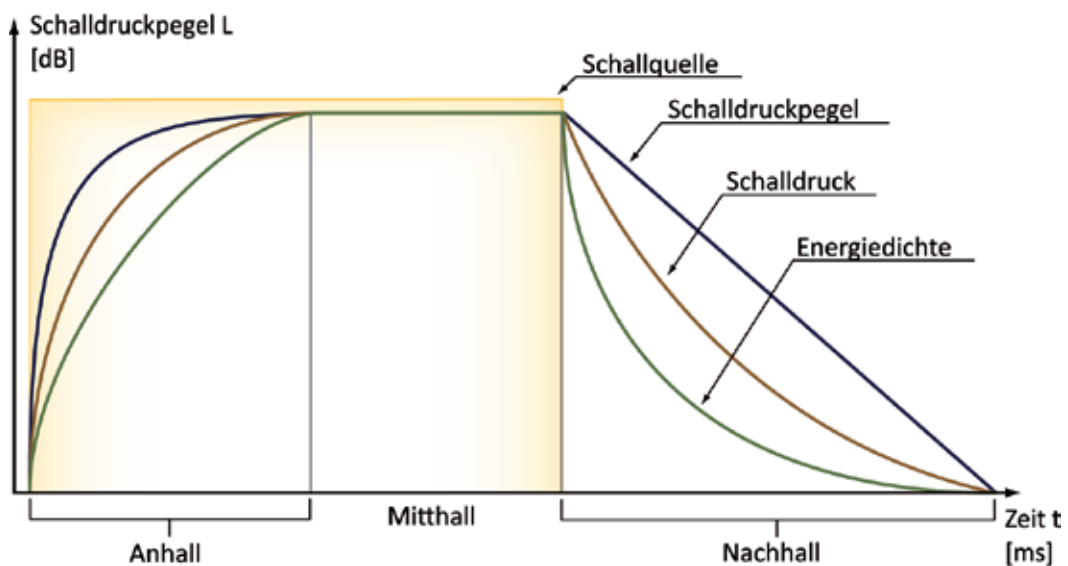


Abb. 1.05 Zeitlicher Ablauf des Diffusschallfeldes
vgl. Dickreiter, 1997, Abb. 1/21

10 vgl. Weinzierl, 2008, Formel 5.1

Ab einem bestimmten Punkt erhöhen sich die Parameter nicht mehr, sondern schwanken um einen Mittelwert. Diese quasistationäre Phase nennt man Mithall. Im Idealfall ist er überall im Raum gleich und bleibt solange konstant wie die Quelle Schall aussendet.

Wird dem diffusen Schallfeld keine Energie mehr zugeführt klingt es langsam aus. Energiedichte, Schalldruck und -pegel nehmen abhängig von den Raumeigenschaften unterschiedlich stark ab. Da dieser so genannte Nachhall vom Hörer am deutlichsten wahrgenommen wird, gibt es dafür eine große Anzahl an Bewertungskriterien (siehe Punkt 1.4.4).

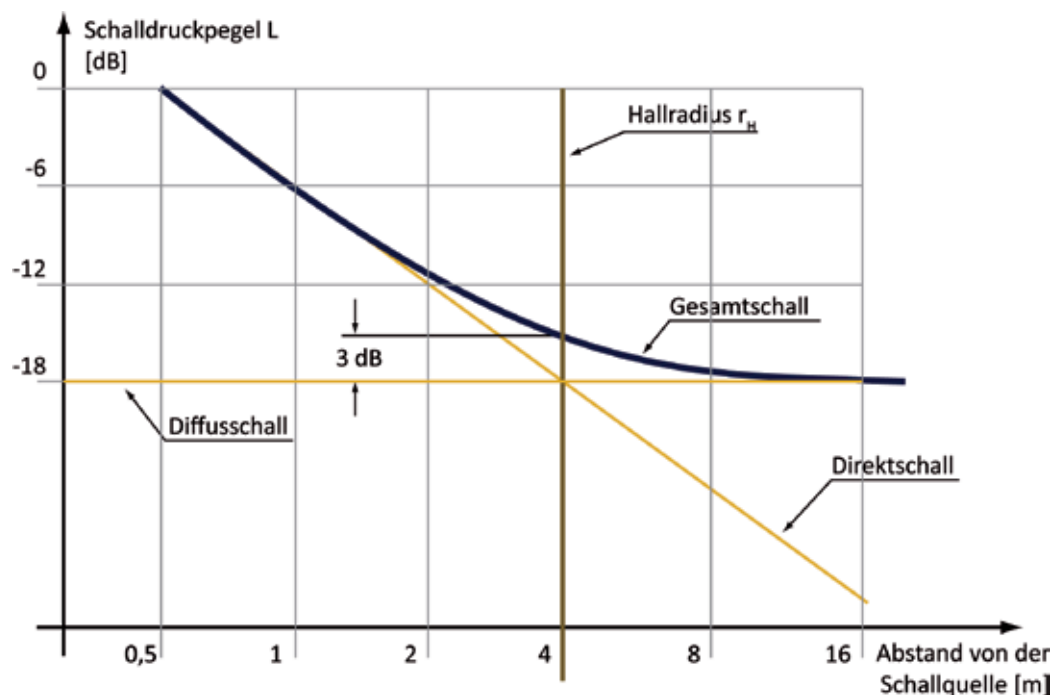


Abb. 1.06 Hallradius
vgl. Dickreiter, 1997, Abb. 1/25

1.4.3 Einfluss von Begrenzungen auf Schallfelder

Änderungen in der Schallausbreitung

Treffen Schallwellen auf ein Hindernis kommt es zu verschiedenen Reaktionen. Dabei muss deren Wellenlänge jedoch kleiner sein wie der Durchmesser des Objektes, andernfalls treten keine Veränderungen auf. Ein Teil des Schalls wird zurückgeworfen (reflektiert). Der Rest dringt in den Körper ein und wird entweder durch Reibung in Wärme umgewandelt (absorbiert) oder durchdringt das Material. Das Verhältnis zwischen diesen drei Möglichkeiten ist abhängig von den Eigenschaften bzw. Abmessungen des Materials, der Entfernung zur Quelle, sowie dem Einfallswinkel des Schalls. Auch ist zu beachten, dass sie das Spektrum nicht einheitlich beeinflussen. Zum Beispiel absorbieren poröse oder weiche Oberflächen (Styropor, Teppiche, etc.) hohe Frequenzen wesentlich besser als tiefere. Sie wirken somit wie eine Art Frequenzfilter, was bei Korrekturen der Raumakustik ausgenutzt wird.

Steht ein schallwirksames Hindernis frei im Raum, bildet sich hinter ihm eine Fläche aus, in welcher die entsprechende Frequenz nicht vorhanden ist. Je größer dabei das Objekt, desto größer ist auch der sogenannte Schallschatten, den es wirft. Er existiert jedoch nur in unmittelbarer Nähe des Hindernisses, da der Schall an den Rändern gebeugt wird. Das Phänomen ist seltener und tritt meist nur bei wechselnder Dichte des Übertragungsmediums auf. In der Praxis ist dies nur bei unterschiedlich warmen Luftmassen zu beobachten. Im Freien kann es dabei zu Überreichweiten von Lautsprecheranlagen kommen. Dabei durchläuft der nach oben abgestrahlte Schall Luftschichten unterschiedlicher Temperatur, welche den Schall allmählich wieder Richtung Erde lenken.

Hall und Hallradius

Ist die abgestrahlte Wellenlänge größer als der Durchmesser der Quelle, handelt es sich um einen punktförmigen Schallsender. Entfernt man sich nun vom Sender, nimmt der Direktschall ab, wobei der Diffusschallpegel (im Idealfall) überall im Raum gleich bleibt (siehe Abb. 1.06). Mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle gleichen sich beide immer mehr an, bis sie schließlich denselben Pegel besitzen. Der Abstand von der Quelle zu diesem Punkt heißt Hallradius r_H (Formel 1.06¹¹) und berechnet sich bei ungerichteten Quellen bzw. Empfängern laut

$$r_H = 0.057 \sqrt{\frac{V}{T}} \quad \text{Formel 1.06}$$

Dabei ist zu beachten, dass er nur vom Raumvolumen V und der Nachhallzeit T abhängig ist. Außerhalb des Hallradius ist der Direktschallanteil geringer als der Diffusschall. Messungen von Schallquellen dürfen somit nicht in zu großer Entfernung

11 vgl. Dickreiter, 1997, S. 36

durchgeführt werden, da sonst die Raumcharakteristik hohen Einfluss auf die Messwerte besitzen. Aufgrund dessen können viele Parameter (z.B. Richtcharakteristik, Übertragungsbereich, etc.) nur in reflektionsarmer Umgebung gemessen werden. Setzt man realistische Werte in die Formel 1.06 ein, ist das Ergebnis selbst für einen idealen Kugelstrahler sehr gering bzw. erhält man brauchbare Werte erst bei sehr großen Räumen.

Die einfachste und effektivste Methode ist die Verwendung gerichteter Sender bzw. Empfänger. Bei Lautsprechern wird dadurch der Raum an sich weniger angeregt und die Energie mehr auf den Zuhörerbereich gelenkt. Resultierend daraus erhöht sich der Direktschallanteil bei gleicher Leistung. Um Verwechslungen vorzubeugen verwendet man für gerichtete Quellen den effektiven Hallradius $r_{H\text{ eff}}$ (Formel 1.07¹²). Es muss nur der spezifische Bündelungsgrad γ eingefügt werden, welcher eine Konstante für bestimmte Abstrahlformen ergibt.

$$r_{H\text{ eff}} = 0.057 \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{V}{T}} \quad \text{Formel 1.07}$$

Raummoden

In der Praxis entstehen Raummoden durch Schallwellen, die an parallelen Flächen mindestens einmal reflektiert werden und sich dadurch selbst überlagern. Die Wellenlänge λ muss dabei die Hälfte des Wandabstandes besitzen. An den Reflektionsflächen ist die Schnelle gleich Null (sogenannter Knoten), nimmt zur Raummitte wieder zu und besitzt ihr Maximum (sogenannter Bauch) auf halber Distanz zu den Wänden (siehe Abb. 1.07). Bei einem konstanten Signal sind diese Bereiche ortsfest und bewirken Einbrüche bzw. Überhöhungen im Frequenzbereich. Diese Verzerrungen im Übertragungsverhalten des Raumes sind in erster Linie von seiner Struktur, als auch von der Position der Quelle abhängig.

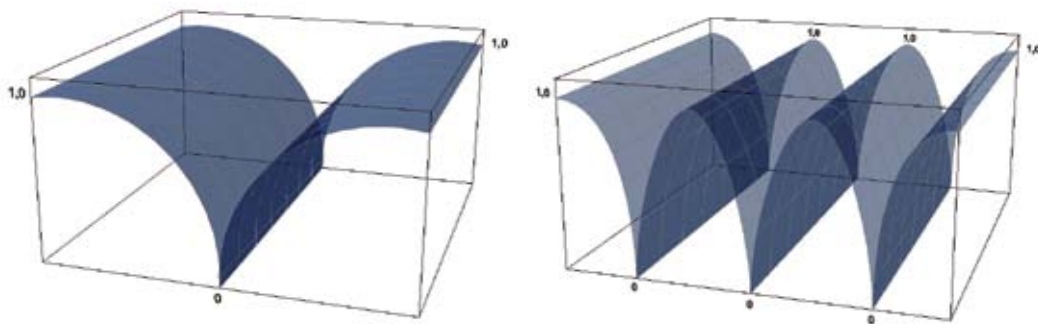


Abb. 1.07 Raummoden
vgl. Jungeblut, 2003, Abb. 3.1

12 vgl. Dickreiter, 1997, S. 37

Man unterscheidet dabei aufgrund der Anzahl von reflektierenden Flächen bzw. notwendigen Dimensionen:



Axiale Moden sind Schall, der zwischen zwei Wänden hin und her wandert. Die Bewegung geschieht innerhalb einer Dimension. Im Vergleich zu allen Moden besitzt er die geringste Anzahl. Eine ungleichmäßige Verteilung kommt somit schnell zustande. Darüber hinaus haben sie den größten Einfluss auf die Raummodenstruktur, weshalb sie in der Raummodenanalyse sehr hohen Stellenwert besitzen.



Tangentiale Moden sind Reflektionen zwischen zwei Wandpaaren und brauchen deshalb zwei Dimensionen. Gegenüber axialen Moden ist ihre Ausbreitungsrichtung komplexer, der Pegelverlust höher und das Spektrum dichter. Sie fallen dadurch im Klang nicht so sehr ins Gewicht.



Oblige Moden werden über sechs Wandflächen reflektiert und benötigen alle drei Dimensionen. Ihr Verlauf ist selbst mit rechnergestützten Modellen schwer nachzuvollziehen. Da sie den geringsten Anteil besitzen und nur in einzelnen Fällen eine inhomogene Struktur aufweisen sind sie vernachlässigbar.

In der Praxis werden jedoch komplexere Räume mit Musiksignalen beschallt, die größtenteils ein kontinuierliches Spektrum besitzen. Hieraus ergibt sich eine Vielzahl von Raummoden, die bei ungleichmäßiger Verteilung ihrer Resonanzfrequenzen einen unnatürlichen Raumklang verursachen. Ziel ist somit nicht ihre Vermeidung sondern ein gleichmäßiger Abstand zwischen den einzelnen Moden.

Die untere Grenze wird vom Wiedergaberaum festgelegt, weil unter der tiefsten Raummode keine Schallausbreitung möglich ist. Ist die Wellenlänge größer als der Abstand zwischen den Wänden kann sich der Ton nicht entwickeln. Die Erzeugung tiefer Frequenzen ist somit nicht nur von der Quelle sondern auch von den Dimensionen des Raumes abhängig.

Ab einem bestimmten Punkt (Schröderfrequenz) liegen die Resonanzen so dicht, dass das Ohr einzelne Frequenzen nicht mehr herausfiltern kann. Folglich wird von einem kontinuierlichem Spektrum bzw. Nachhall gesprochen.

1.4.4 Bewertung von akustischen Raumeigenschaften

Subjektive Qualitätskriterien

Diese Kategorie beinhaltet die Merkmale eines Raumes, die durch Bewertung von Höreindrücken entstehen. Dabei legt Dickreiter zusätzliche Unterteilungen fest. Zum Beispiel gibt die räumliche und zeitliche Struktur des Raumes Auskunft über die Halligkeit, den allgemeinen Raumeindruck, die Entfernungswahrnehmung und die Durchsichtigkeit. Zwar benötigt man für die Ermittlung keine Messgeräte, jedoch setzt ein valides Urteil ein gutes Gehör mit besonderer Schulung voraus. Ein einfacher Test, ohne hohe Anforderungen, ist der Sprachverständlichkeitstest. Er liefert Informationen über die Hörsamkeit von Räumen. Eine Person liest dabei Wort- und Silbenkombinationen laut vor, die eine andere in einiger Entfernung aufschreibt. Ein Vergleich der beiden Aufzeichnungen lässt eine Aussage über die Verständlichkeit im Raum treffen. Die Wörter dürfen weder inhaltliche Bedeutung besitzen noch alltägliche Silben enthalten. Laut Dickreiter¹³ lässt eine Silbenverständlichkeit von 80% eine hundertprozentige Satzverständlichkeit schließen. Die spektrale Struktur eines Raumes gibt Auskunft über die Ausgewogenheit, Brillanz, Wärme und Klangverfärbungen des Schalls. Unter der dynamischen Struktur fasst Dickreiter alle Parameter zusammen, wie zum Beispiel die maximale Lautstärke, vorhandene Störgeräusche oder die Klangfülle des Raumes beschreiben.

Objektive Qualitätskriterien

Diese Faktoren können mithilfe von Messprogrammen ermittelt werden. Dickreiter gibt auch hier eine Anzahl von Bewertungskriterien an, wovon hier nur die Wichtigsten davon erklärt sind.

Der meist genannte Vertreter ist die Nachhallzeit RT_{60} . Er beschreibt die Zeit, die der Hall nach Abschalten der Quelle benötigt, um auf ein Tausendstel (=60dB) seines ursprünglichen Wertes abzuklingen. Messungen in einem solch großen Bereich sind jedoch sehr schwierig, da der Nachhall durch die Intensität des Messsignales und den Ruhepegel des Raumes begrenzt wird. Deshalb ermittelt man in der Praxis eher die Zeit die das Signal benötigt, um von -5dB auf -35dB abzusinken. Durch Verdoppeln des Wertes erhält man dann die Nachhallzeit.

Neben der messtechnischen Ermittlung lässt sich die Dauer auch anhand der Nachhallformel von Sabine (siehe Formel 1.09¹⁴) errechnen.

$$RT_{60} = 0.163 \frac{V}{A} \quad \text{Formel 1.08}$$

13 vgl. Dickreiter, 1997, S. 68

14 vgl. Dickreiter, 1997, S. 32

Der Nachhall ist nur vom Raumvolumen V und vom Absorptionsvermögen A abhängig. Jedoch erreicht der Wert von RT_{60} selbst bei vollständiger Absorption ($A=1$) nie Null. Aufgrund dieses Fehlers stellte Eyring eine verbesserte Nachhallformel auf (siehe Formel 1.08¹⁵). Sie berücksichtigt die Gesamtoberfläche des Raumes S und den dimensionslosen mittleren Absorptionsgrad α_m

$$RT_{50} = 0.163 \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_m)} \quad \text{Formel 1.09}$$

Im Laufe der Zeit haben sich gemäß Michael Dickreiter¹⁶ Richtwerte für verschiedene Wiedergabesituationen herausgebildet. Ein besonders kurzer Nachhall empfiehlt sich für reine Sprachaufnahmen. So sollte er in entsprechenden Studios 1s nicht überschreiten, damit der Klanganteil des Raumes nicht zu groß wird. Will man jedoch einen künstlichen Nachhall einfügen, darf der natürliche Raumhall nicht über 0,2s betragen (reflektionsarmer Raum). Für Musik werden nicht solche geringen Werte gefordert, so liegen die Zeiten für Klassik zwischen 1,8s und 2s. Da die meisten Räume jedoch nicht nur für eine bestimmte Musikrichtung konstruiert wurden (z.B. bei Mehrzweckräumen) ergeben sich folgende allgemeinen Durchschnittswerte:

- Opernhaus 1,5s
- Konzertsaal 2s
- Kirchen 2,5..10s
- großes Fernsehstudio 0,8s

Trifft der Hall innerhalb der ersten 80ms nach dem Direktschall ein, verstärkt er die Deutlichkeit bei Musikwiedergabe. Das Klarheitsmaß gibt Auskunft über diese Verstärkung. Grundlage dafür ist das Verhältnis der Schallintensität innerhalb der ersten 80ms nach Eintreffen am Zuhörerplatz zur Schallintensität der restlichen Zeit. Solange die Werte zwischen -1 und +3dB liegen, ist auch die Durchsichtigkeit des Raumklanges gut¹⁷.

¹⁵ vgl. Dickreiter, 1997, S. 32

¹⁶ vgl. Dickreiter, 1997, Tab. 1/6

¹⁷ vgl. Huber, 2004, S.38

1.5 Schallsender

Im Folgenden sind kurz die Eigenschaften, Bauweisen, Funktionsprinzipien und Probleme bei der Lautsprecherkonstruktion erläutert. Dabei ist zu beachten, dass es verschiedene Anwendungsgebiete von Schallsendern gibt. Aufgrund dessen werden teilweise auch sehr unterschiedliche Anforderungen an den Lautsprecher gestellt. Welche Kriterien vom TS56k gefordert werden ist in [Punkt 2.1.1](#) nachzulesen.

1.5.1 Notwendigkeit gerichteter Systeme

Um den Diffusschallanteil in einem Raum zu verringern, empfiehlt es sich gerichtete Quellen zu verwenden. Diese erhöhen den Direktschall am Hörerplatz ohne das Diffusfeld stärker anzuregen. Auch werden dadurch ungünstige Effekte wie stehende Wellen oder Echos, die von einer schlechten Raumakustik herrühren, verringert.

Bei einer Beschallung wird versucht Bühne und Zuschauerbereich akustisch voneinander zu trennen, da ersterer meist einen anderen bzw. unausgewogenen Charakter besitzt. Gelangt dennoch Schall von Monitoren oder Sidefills in den Zuschauerraum fügt er dem Klangbild meist ungewollte Anteile hinzu bzw. ruft Verfärbungen durch Auslöschungseffekte hervor. Ist der Pegel der Bühnenlautsprecher so hoch, dass sie lokalisiert werden können stört, dies außerdem das Stereo-Panorama. Eine gerichtete Abstrahlung ist somit besonders in der Nähe der Zuhörer notwendig. Zusätzlich wird Störschall vermieden und die Rückkopplungsgefahr vermindert.

1.5.2 Elektrodynamische Treiber

Bei dieser Art von Lautsprechern werden die mechanischen Schwingungen durch eine Spule erzeugt, die sich in einem starken Magnetfeld befindet. Fließt Strom durch die Wicklungen, wird sie aufgrund der Lorenz-Kraft entweder in das Magnetfeld hineingezogen oder herausgestoßen. Diese Bewegung, welche analog zur wechselnden Spannung ist, wird auf die Membran bzw. Kalotte übertragen und versetzt somit die Luftteilchen in Schwingung. Da alle hier untersuchten Schallsender nach dem elektrodynamischen Prinzip arbeiten beschränken sich die folgenden Erklärungen auf diese Kategorie.

Kalottenlautsprecher

Beim Kalottenlautsprecher (siehe [Abb. 1.08](#)) ist der Spulenträger einseitig mit einer Kalotte verschlossen, die akustisch direkt wirksam ist. Der Wiedergabebereich wird überwiegend vom Durchmesser bestimmt. Unterhalb 400Hz gestaltet sich die Konstruktion als zu groß, weshalb sie nur im oberen Übertragungsbereich zum Einsatz kommt.

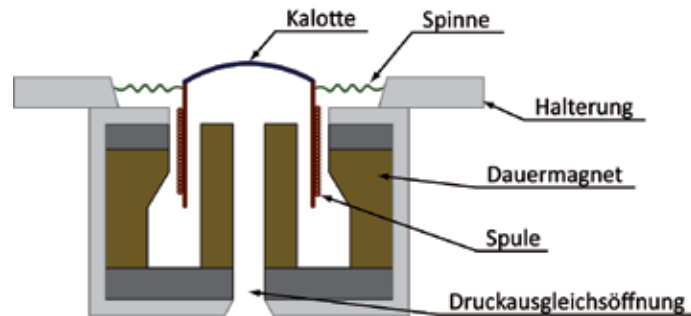


Abb. 1.08 Kalottenlautsprecher
vgl. Dickreiter, 1997, Abb. 4/1

Im Aufbau nimmt der Magnet den größten Teil des Gewichts in Anspruch. Neuere Neodym-Komponenten verringern dieses zu Lasten eines kleineren Sättigungsbereiches. Die Spinne fixiert die Membran, sodass die Spule ohne Reibungswiderstand in den Luftspalt des Dauermagneten eintauchen kann. Eine Öffnung ermöglicht den Druckausgleich zwischen innerer und äußerer Atmosphäre.

Konuslautsprecher

Durch die Ergänzung einer weiteren Membran erhält man einen Konuslautsprecher (siehe Abb. 1.09). Ist ihr Durchmesser groß genug, reicht der Übertragungsbereich bis an die untere Hörgrenze. Die tiefst-mögliche Frequenz wird dabei von der Eigenresonanz des Konus bestimmt und kann durch die Aufhängung beeinflusst werden. Ihr Abstrahlwinkel ist durch die zusätzliche Membran gerichtet. Alle übrigen Komponenten sind analog zum Kalottenlautsprecher. Auch hier werden größtenteils Neodym-Magnete verwendet.

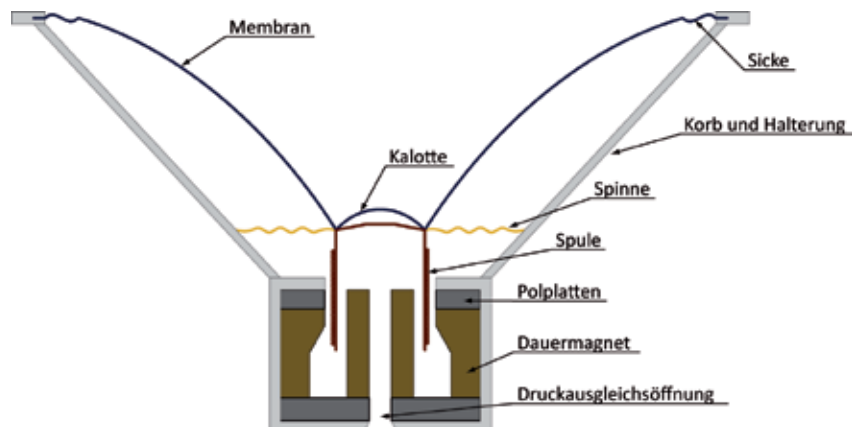


Abb. 1.09 Konuslautsprecher
vgl. Dickreiter, 1997, Abb. 4/1

Verzerrungen

Schwingungen hoher Frequenz kann die Konusmembran nicht exakt ausführen. Auf der Oberfläche des Trichters bilden sich sogenannte Partialschwingungen (siehe Abb. 1.10) aus. Sie fügen dem Klang künstliche Anteile hinzu, die im ursprünglichen Signal nicht enthalten waren und beeinflussen es negativ. Man spricht demzufolge von Verzerrungen. Große planare Flächen bzw. eine geringe Steifigkeit der Membran begünstigen diesen Effekt. Die Verwendung einer ringförmigen Verstärkung des Konus an der Innen- und Außenseite, sowie eine nicht abwickelbare Form (eine so genannte NAWI-Membran) wirken dem entgegen.

Da der Lautsprecher viele verschiedene Frequenzen gleichzeitig erzeugen muss entstehen Summen- und Differenztöne. Sie treten besonders bei Wiedergabe von zwei Tönen unterschiedlicher Frequenz auf. Während der schnellen Schwingung bewegt sich die Membran zusätzlich um ihre Ruhelage (zur Wiedergabe des tiefen Tones). Diese Ortsänderung verursacht einen Doppler-Effekt, der Verzerrungen hervorruft. Verzerrungen entstehen auch, wenn die Spule das anliegende Signal nicht linear umsetzen kann. Sie muss das magnetische Feld somit auch bei maximaler Auslenkung vollständig abdecken, darf aber andererseits nicht zu groß sein, da sich sonst der Wirkungsgrad verringert. Ist die Spule drei Mal so breit wie das Magnetfeld kann man beide Bedingungen erfüllen.

Soll ein Signal mit sehr kurzem Einschwingen (im Extremfall rechteckförmig) übertragen werden, verursacht auch die Trägheit des Lautsprechers Verzerrungen. Dieser Effekt ist auch beim plötzlichen Aussetzen des Signals zu beobachten. Die Membran kann aufgrund ihrer Masse nicht sofort still stehen, schwingt noch nach und fügt dem Signal künstliche Anteile hinzu. Neue Systeme reagieren jedoch ausreichend schnell, wodurch Verzerrungen dieser Art seltener auftreten. Darüber hinaus besitzt ein Großteil der Signale keine solch geringen Ein- und Ausklingzeiten.

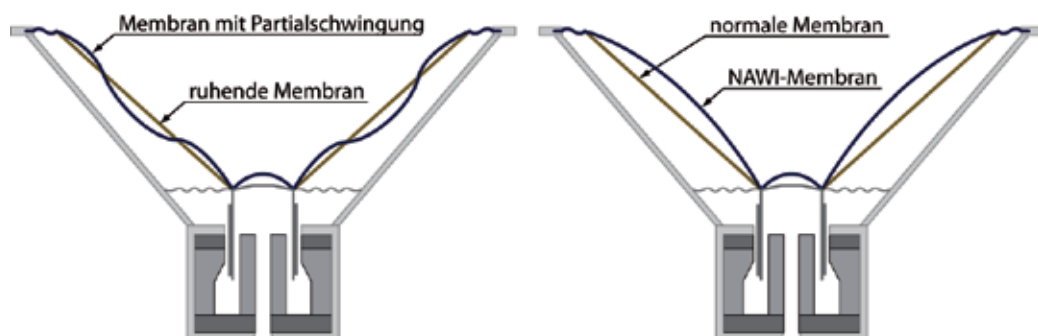


Abb. 1.10 Partialschwingungen
vgl. Gedeon, Panagiotis, Lautsprecher und deren Eigenschaften, Ferienakademie 2004 Universität Stuttgart, <http://www.ipe.uni-stuttgart.de/content/web4/vortraege/Lautsprecher.pdf>,
Aufgerufen am 20.8.2010

1.5.3 Gehäuse und Bauweisen

Frequenz- und Abstrahlverhalten

Das Gehäuse dient der Trennung von Vorder- und Rückseite der schwingenden Membran (siehe Abb. 1.11). Ohne diese löschen sich die Druckschwankungen gegenseitig aus (akustischer Kurzschluss genannt), wodurch der Wirkungsgrad des Senders gegen Null sinkt.

Im oberen Frequenzbereich hat das Lautsprechergehäuse keinen Einfluss auf das Abstrahlverhalten, schwingt jedoch innerhalb seiner Resonanzfrequenz stark mit. Infolgedessen wird es selbst zum Schallsender und eliminiert die Richtwirkung des Lautsprechers. Der Übertragungsbereich des Lautsprechers wird demnach oberhalb der Resonanzfrequenz angesiedelt.

Zusätzliche Verzerrungen entstehen durch Auslöschungen des Schalls zwischen Chassis und Treiber.

Geschlossenes Gehäuse

Eine einfache Wand als Abtrennung nimmt zu große Maße an. Die Verwendung eines geschlossenen Gehäuses ist demnach empfehlenswert (siehe Abb. 1.12). Durch die Form entsteht ein theoretisch unendlicher Umweg bei gleichzeitig sehr geringem Platzaufwand. Er besitzt lediglich eine kleine Öffnung zum Ausgleich langsam wechselnder Luftdruckunterschiede. Wie oben schon erwähnt, ist der obere Frequenzbereich vorrangig vom Lautsprecher abhängig und besitzt einen relativ hohen Bündelungsgrad.

Der untere Übertragungsbereich wird mehr vom Luftvolumen innerhalb des Gehäuses bestimmt. Es schiebt aufgrund seiner Steifigkeit die Resonanzfrequenz der Membran nach oben. Diese definiert die unterste Grenzfrequenz, da darunter die Übertragungskurve mit 12dB pro Oktave absinkt. Systeme, die auch den Tieftonbereich abdecken, haben deshalb sehr große Abmessungen. Der Phasenunterschied bleibt dafür auch im unteren Frequenzbereich relativ gering.

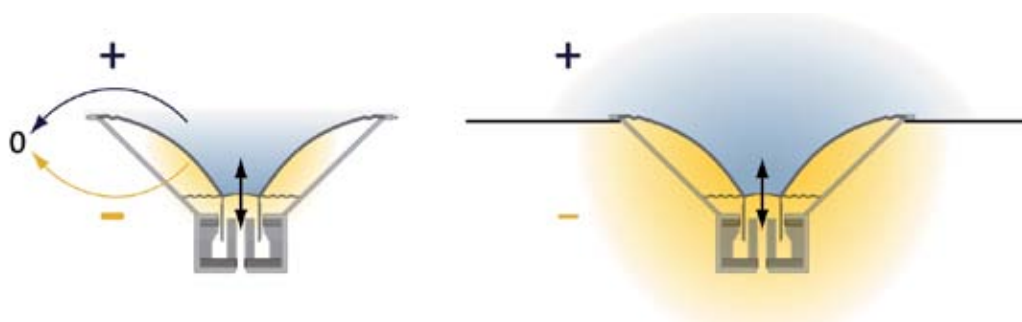


Abb. 1.11 Akustischer Kurzschluss
vgl. Veith, 1988, Abb. 9.3



Abb. 1.12 Geschlossenes Lautsprechergehäuse
vgl. Weinzierl, 2007, Abb. 8.6

Um störende Reflektionen an der Rückwand des Gehäuses zu vermeiden, wird in diesem Bereich Dämmmaterial angebracht. Andernfalls vermischt sich der zurückgeworfene Schall an der Vorderseite mit dem direkt abgestrahlten und führt zu störenden Auslöschungseffekten.

Bassreflex-Gehäuse

Im Gegensatz zu einem normalen Gehäuse besitzt die Bassreflexbox eine Anhebung zwischen 150 und 300 Hz (siehe [Abb. 1.13](#)). Realisiert wird dies durch das Helmholtz-Prinzip. Das innere Luftvolumen wird durch die Membran zum Schwingen angeregt. Die Frequenz liegt dabei, gemäß Helmholtz, im Bereich der Resonanz des Luftvolumens. Durch eine Öffnung an der Vorderseite der Box kann der Schall austreten und vermischt sich phasengleich mit dem Direktsignal. Das Resultat ist eine schmalbandige, aber starke Anhebung im Bereich der Resonanzfrequenz.

Weitere Arten sind Bandpass-, Transmission-Line-, Horngeladene Gehäuse, sowie offene Dipolstrahler. Da diese für den weiteren Verlauf nicht relevant sind, werden sie hier nicht erwähnt.



Abb. 1.13 Bassreflex Lautsprecher
vgl. Weinzierl, 2007, Abb. 8.6

Filterfunktion der Gehäuse

Wie oben schon erwähnt, beeinflusst die Phasendrehung im unteren Übertragungsbereich stark den Klangeindruck. Zur besseren Erklärung der Effekte behilft man sich systemtheoretischer Grundbegriffe. Eine geschlossene Box ähnelt demnach einem Hochpass 2. Ordnung, das Bandpassgehäuse einem 4. Ordnung. Zusätzlich integrierte elektronische Filter können noch höhere Grade erreichen. Zudem wird dadurch der Lautsprecher vor tiefen und energiereichen Signalen geschützt, welche starke Verzerrungen und sogar die Zerstörung des Lautsprechers hervorrufen können. Die zusätzliche Filterfunktion ermöglicht auch den Bau kleinerer Gehäuse. Mit steigender Ordnung nimmt die Flankensteilheit des Filters zu. Verwendet man verschiedene Lautsprecher für spezielle Frequenzbereiche, kann man mithilfe steiler Filterkurven eine bessere Trennung der Quellen vornehmen. Je komplexer deren Funktion, desto größer die Phasendrehung und die Gruppenlaufzeit, welche das wahrgenommene Klangbild verschlechtert. Bei tiefen Frequenzen entfernt man diese durch entsprechende FIR-Filter. Dadurch entsteht ein zeitlich homogenes Schallfeld, das durch die Anpassung eine gewisse Grundverzögerung besitzt.

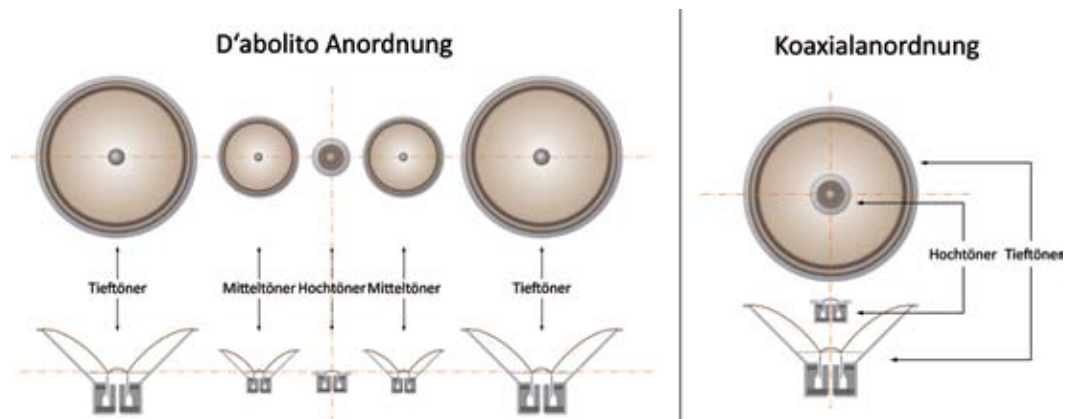


Abb. 1.14 Arten der Treiberanordnung
vgl. Vorlesungsunterlagen Prof. Dr.-Ing. Michael Hösel

Mehrwegebox

Um einen großen Frequenzbereich abzudecken werden mehrere einzelne Lautsprecher verwendet, die auf ihr jeweiliges Frequenzband optimiert sind. Darüber hinaus arbeiten diese wesentlich wirtschaftlicher, haben einen geringeren Klirrfaktor und besitzen ein besseres Abstrahlverhalten. Sind sie in einem Gehäuse kombiniert handelt es sich um einen Mehrwegelautsprecher.

D'abolito-Anordnung

Die Verwendung mehrere Lautsprecher für ein Signal vergrößert die Wiedergabefläche. Die oberen, mittleren und tiefen Frequenzen strahlen nicht mehr aus einem zentralen Punkt ab. Bei geringem Hörabstand wird dies als unnatürlich empfunden und verursacht unterbewussten Stress. Um den Effekt zu verringern wird bei schmalen Gehäusen die D'abolito-Anordnung benutzt. Wie in Abb. 1.14 zu sehen, sind dabei die hochfrequenten Treiber zentral angeordnet, da das Ohr hohe Töne besser lokalisieren kann. Danach folgen Mittel- bzw. ganz außen Tieftöner. Die empfundene Wiedergabefläche wird dadurch zwar verringert, jedoch ändert sich nichts am real vorhandenen Abstand der Treiber. Da alle Quellen auf einer Ebene angeordnet sind braucht es keine zusätzliche Anpassung der Laufzeit.

Koaxiallautsprecher

Bei der Koaxialanordnung liegen alle Treiber hintereinander auf einer einzigen Achse (siehe Abb. 1.14). Wie bei natürlichen Quellen wird der gesamte Schall aus einem Punkt wiedergegeben. Die unterschiedlichen Abstände zwischen Treiber und Hörer müssen durch elektronische Laufzeitglieder ausgeglichen werden.

1.5.4 Parameter zur Beschreibung von Lautsprechern

Zwar gibt es eine Vielzahl von charakterisierenden Parametern, jedoch ist ihr Rückschluss auf die Klangqualität auch heute noch umstritten. Eine gute Bewertung der Qualität kann somit nur erreicht werden, wenn neben den Parametern auch Hörtests zur Beurteilung herangezogen werden.

Jeder Lautsprecher besitzt eine frequenzabhängige Impedanz. Sie setzt sich zusammen aus allen Treibern des Lautsprechers, sowie den eingebauten Filterschaltungen. Da ein gewisser Wert für den Widerstand notwendig ist um ihn an die Verstärkertechnik anzupassen wurde der Begriff Nennimpedanz eingeführt. Nach EN 60268-5 darf die gesamte Impedanzkurve nicht unter 20%¹⁸ dieses Wertes sinken.

Der Phasengang eines Lautsprechers wird durch alle Bauteile beeinflusst. Somit besitzt das Ein-Wegesystem in einer geschlossenen Box nahezu Allpasscharakteristik, wo hingegen Mehrwegesysteme mit speziellen Gehäuseformen (z.B. Bassreflex- oder Exponentiallautsprecher) schnell eine hohe Phasendrehung aufweisen. Auch passive Filternetzwerke, sowie Laufzeitunterschiede können starke Abweichungen in der Phase verursachen.

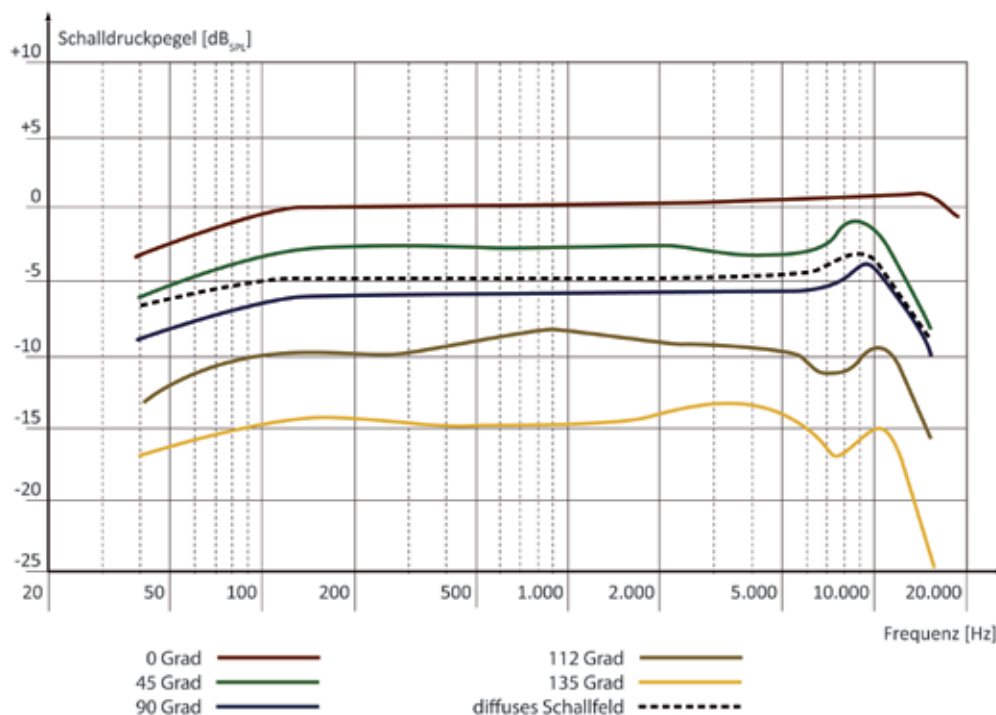


Abb. 1.15 Amplituden-Frequenz-Diagramm
vgl. Dickreiter, 1997, Abb. 4/4

¹⁸ vgl. Weinzierl, 2008, S. 472

Um das Ausschwingverhalten des Lautsprechers zu testen, wird dem System ein Dirac-Stoß aufgezwungen und mithilfe der gefensterten Fouriertransformation in den Frequenzbereich übertragen. Im Diagramm lässt sich dann das Ausschwingen aller Frequenzen darstellen und eventuelle Resonanzen oder spät einschwingende Bereiche ermitteln.

Der Nenn-Frequenzbereich ist eine Angabe der Hersteller über die grobe Einordnung aufgrund seines Übertragungsbereiches (z.B. Hoch- oder Tieftöner).

Der Kennschalldruck wird nur innerhalb eines eingeschränkten Frequenzbereiches gemessen und ist lediglich ein gemittelter Wert. Um detaillierte Aussagen über das frequenzabhängige Wandlungsverhalten zu erfahren benötigt man das Übertragungsmaß. Dieses wird durch eine Kurve im Amplituden-Frequenz-Diagramm dargestellt (siehe Abb. 1.15). Solange nichts anderes angegeben ist, beziehen sich die Werte auf das freie Schallfeld. Die maximale Abweichung beträgt dabei 6dB. Die Stelle, wo die Übertragungskurve diese Toleranz überschreitet bildet die obere und untere Grenzfrequenz. Der Abschnitt dazwischen wird Übertragungsbereich genannt. Besitzen die Frequenzeinbrüche weniger als eine Terz Bandbreite werden sie nicht beachtet.

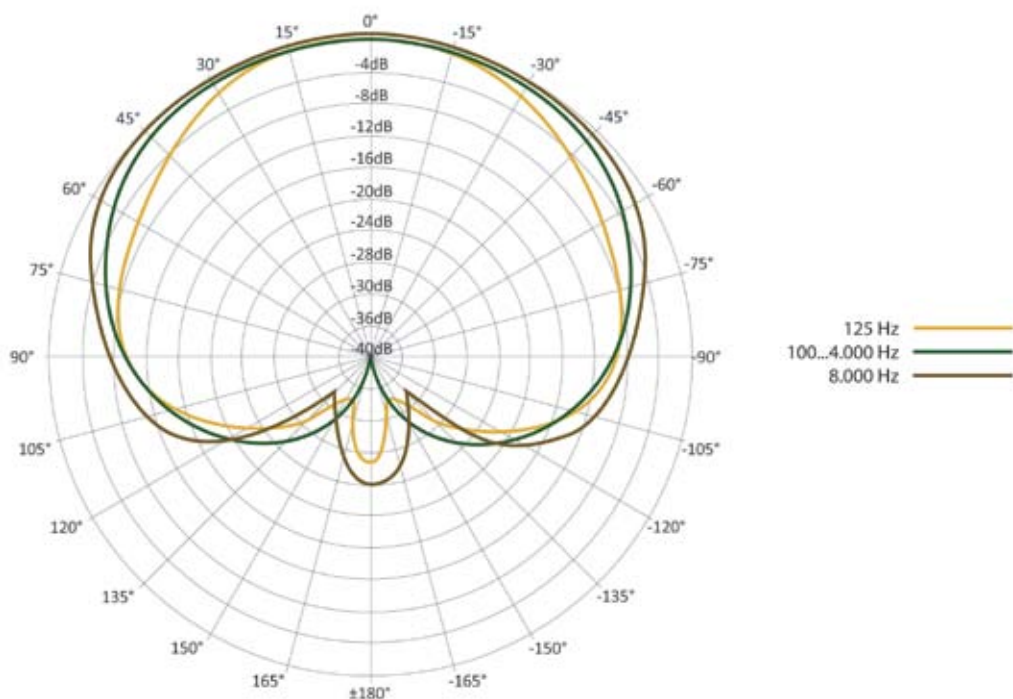


Abb. 1.16 Polardiagramm
vgl. Dickreiter, 1997, Abb. 4/4

Der Richtungsfaktor ist das Verhältnis zwischen dem Pegel in einem bestimmten Winkel zu einem Referenzpegel auf der akustischen Achse. Er wird im freien Schallfeld gemessen und kann in einem Polardiagramm grafisch dargestellt werden (siehe Abb. 1.16).

Mithilfe der computergestützten Messtechnik ist es möglich, den Pegelabfall eines Lautsprechers über Isobarenkurven noch anschaulicher darzustellen. Dabei werden Bereiche mit gleichem Pegelabfall gegenüber dem Pegel auf der akustischen Achse zusammengefasst und in einer Fläche dargestellt (siehe Abb. 1.17).

Zur vollständigen Veranschaulichung der Abstrahlcharakteristik ist ein dreidimensionales Modell notwendig, welches Balloon-Darstellung genannt wird.

Der Bündelungsgrad vergleicht Direkt- und Diffusschall miteinander. Werte größer 1 bedeuten, dass der Pegel aus dieser Richtung höher als der von einer vergleichbaren kugelförmigen Quelle ist.

Nichtlineare Verzerrungen

In der Übertragungskette sind besonders Lautsprecher anfällig für Verzerrungen. Bei allen unten aufgeführten Angaben ist jedoch folgendes zu beachten.

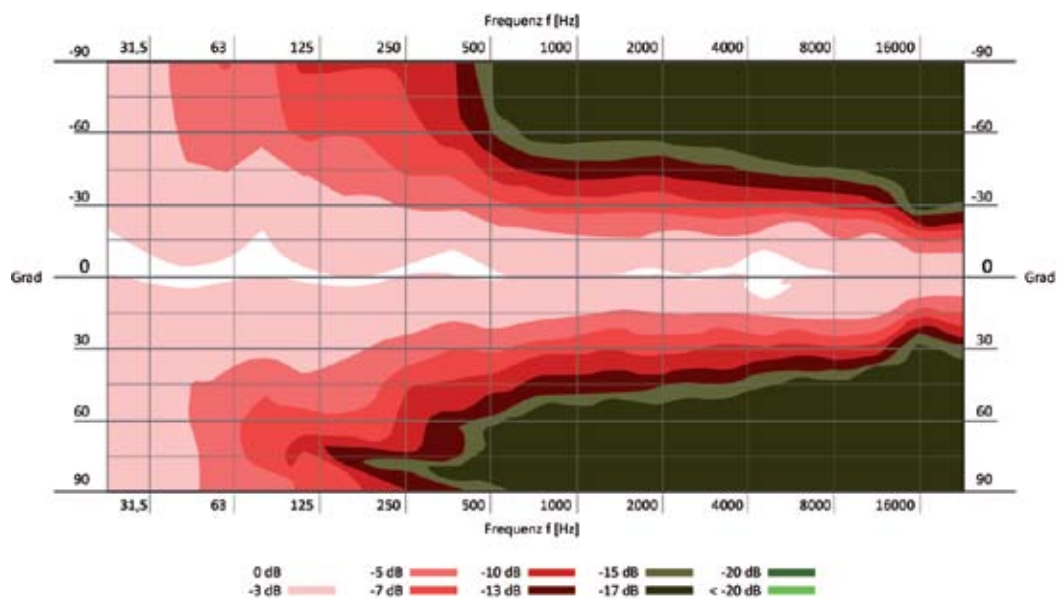


Abb. 1.17 Isobarendiagramm
vgl. Weinzierl, 2008, Abb 8.14

Damit Verzerrungen überhaupt wahrgenommen werden können, müssen sie oberhalb der Hörschwelle liegen. Außerdem ist die empfundene Lautstärke abhängig von der Frequenz (siehe Abb. 1.02). Da das menschliche Ohr harmonische Schwingungen als natürlich interpretiert, werden sie auch nur bei großer Amplitude als Verzerrung erkannt. Außerdem nimmt ihr Einfluss mit steigendem Grad ab, sodass es meist ausreicht, die ersten Fünf zu ermitteln.

Der Klirrfaktor ist der bekannteste Vertreter aus dem Bereich der Verzerrung. Er gibt an, wie viel Prozent (vom wiedergegebenen Signal) durch das Übertragungssystem künstlich hinzugefügt wurde. Er beschränkt sich dabei auf alle harmonischen Schwingungen. Die subjektive Wahrnehmung ist jedoch nicht analog zu den messtechnisch ermittelten Werten. In einem Musiksinal zum Beispiel kann durch Verdeckungseffekte selbst einen Klirrfaktor von 10%¹⁹ noch nicht bemerkbar sein. Außerdem lässt er sich nur unterhalb von 10kHz einsetzen, darüber liegen alle Vielfachen oberhalb von 20kHz und sind für Untersuchungen nicht relevant.

In den meisten Fällen muss das System mehrere Frequenzen gleichzeitig wiedergeben. Da aber der Klirrfaktor nur die Verzerrungen bei einer Schwingung untersucht, benötigt man noch weitere Parameter. Der Intermodulationsfaktor konzentriert sich auf die Untersuchung von Summen und Differenztönen, die entstehen, wenn zwei Frequenzen über ein nichtlineares System wiedergegeben werden. Sein prozentuales Ergebnis ist der Anteil der Verzerrung am Gesamtsignal. Diese werden vom Ohr wesentlich deutlicher wahrgenommen, als es beim Klirrfaktor der Fall ist. Der Intermodulationsfaktor beschränkt sich auf die Untersuchung von mittleren Frequenzen.

Der Differenztonfaktor wurde speziell für den Obertonbereich entwickelt. Er ist aus dem Intermodulationstonfaktor abgeleitet und kann auch für mittlere und tiefe Frequenzen genutzt werden.

1.5.5 Lösungen für große Beschallungsflächen

Schallzeile

Besonders bei Beschallungen im Freien werden oft deutlich höhere Lautsprecherleistungen gefordert als in geschlossenen Räumen. Grund dafür sind u.a. fehlende Wand-Reflektionen, weiträumig Beschallungsflächen und ein großer Abstand zwischen Quelle und Senke. Deshalb werden Lautsprecher mit großer Bündelung verwendet. Sie konzentrieren mehr Leistung auf einen Ort, können dadurch aber keine solch große Fläche mehr beschallen. Aufgrund dessen werden mehrere solcher Quellen zusammen in einigen Metern Höhe angebracht. Die Treiber einer sogenannten Schallzeile (siehe Abb. 1.18) sind dabei in einer Ebene parallel zueinander angeordnet. Gespeist wird der Lautsprecher durch einen einzelnen Verstärker.

¹⁹ vgl. Dickreiter, 1997, S. 440

Der Übergang zum Fernfeld definiert Formel 1.10²⁰. Er ist somit wesentlich Abhängig von der Länge l der Quelle, sowie der wiedergegebenen Frequenz f und der Schallgeschwindigkeit c . Bei einem 1m hohen Lautsprecher der oben festgelegten Schallgeschwindigkeit von $331,6 \text{ ms}^{-1}$ beträgt das Nahfeld selbst für 1kHz nur noch 1,5m. Außerhalb dieses Radius wandelt sich die Ebene- in eine Kugelwelle und die zylindrische Abstrahlcharakteristik verliert sich für 1kHz. Wie aus der Formel zu entnehmen verringert sich der Radius zu höheren Frequenzen noch weiter.

$$r = \frac{l^2 f}{2c}$$

Formel 1.10

Die Theorie der homogenen Abstrahlung durch Aneinanderreihung von Quellen ist in der Praxis nicht ohne Probleme umsetzbar. Bei Verwendung einzelnen längliche Membran (ähnlich eines Bändchenlautsprechers) besitzt diese gute Abstrahlcharakteristiken. Aufgrund der großen planaren Fläche kommt es jedoch schnell zu Partialschwingungen.



Abb. 1.18 Schallzeile E 90 MKII von KLING & FREITAG GmbH
vgl. KLING & FREITAG GmbH, K&F E 90 MK II, Erstellungsjahr 2009, <http://www.kling-freitag.biz/101.0.html>, Datum des Aufrufs 9.08.2010

20 vgl. Weinzierl, 2008, Formel 8.5

Der Einsatz mehrerer einzelner Treiber in einer vertikalen Linie ist demnach unumgänglich. Je höher die abgestrahlte Frequenz, desto stärker bündelt sich auch der Schall. Ab einer bestimmten Frequenz treten deshalb Nebenkeulen auf. Abb. 1.19 zeigt das simulierte Abstrahlverhalten einer Schallzeile mit 12 Kalottentreibern. Bis 2 kHz ist dieses noch relativ Homogen, jedoch ab 4 kHz sind erste Nebenmaxima erkennbar. Eine homogene Charakteristik kann dann nicht mehr zustande kommen. Grund ist die bei hohen Tönen nicht stattfindende Summierung der einzelnen Wellenfronten. Da keine geeigneten Berechnungsmethoden vorhanden waren bestand, vor 1992²¹ nicht die Möglichkeit diese Probleme zu beheben.

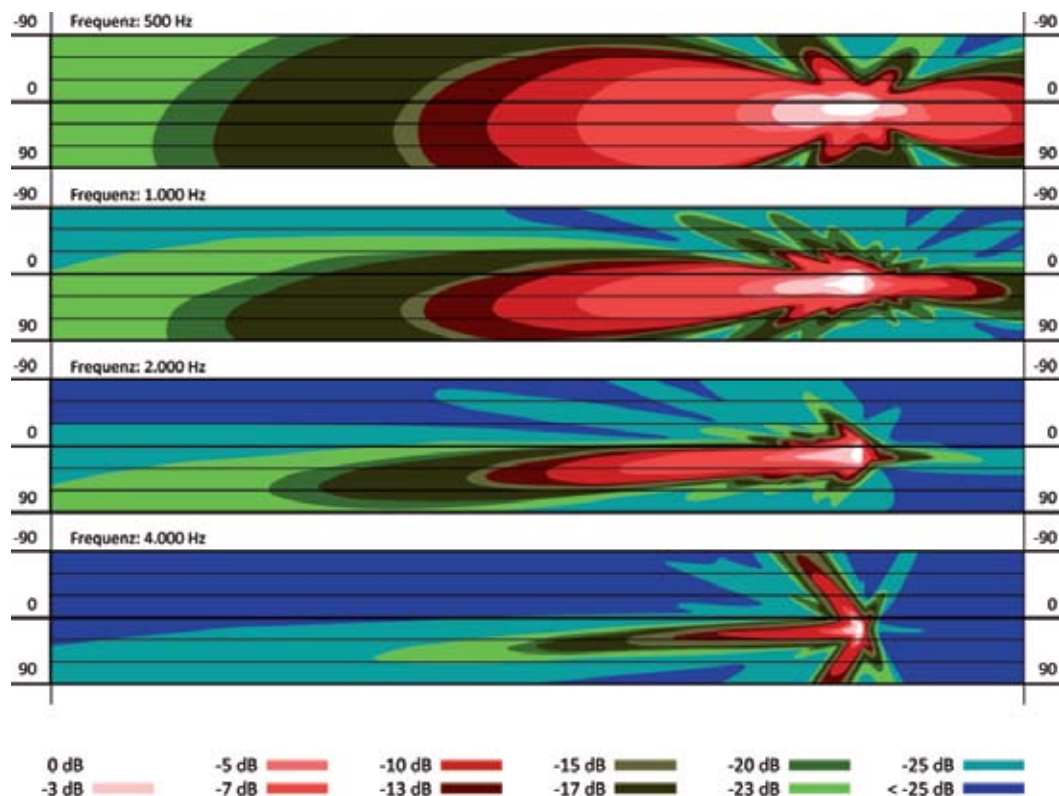


Abb. 1.19 Richtcharakteristik-Simulation einer Schallzeile
vgl. Weinzierl, 2008, Abb. 8.17

²¹ vgl. Holtmeyer, 2003, S. 2

Line-Array

Erst die Erforschung der "Wave Front Sculpture Technology" von Heil und Urban ermöglichte diese komplexen Interferenzen zu beschreiben bzw. zu vermeiden.

Der grundlegende Unterschied eines Line Arrays (siehe Abb. 1.20) zu einer Schallzeile ist die sehr enge Anordnung der Treiber, die nicht nur innerhalb eines, sondern auch zwischen mehreren Lautsprechern gewährleistet sein muss. Solange die Distanz (Mitte zu Mitte der Treiber) kleiner bzw. gleich der halben Wellenlänge ist, addieren sich die Quellen zu einer homogenen Abstrahlung. Ist der Abstand jedoch zu groß, zerfällt die einheitliche Wellenfront und es entstehen übermäßige Nebenkeulen. Grund dafür ist die zunehmende Richtwirkung bei steigender Frequenz.



Abb. 1.20 Line-Array M'elodie von MEYER SOUND
vgl. MEYER SOUND GmbH, M'elodie, Erstellungsjahr 2010, <http://www.meyersound.de/products/mseries/melodie/>, Datum des Aufrufs 7.08.2010

Da die Wellenlänge im unteren Frequenzbereich noch ausreichend groß ist, werden hier meist Konuslautsprecher verwendet. Vorteilhaft ist der Einsatz von Mehrwegsystemen, weil bei zunehmender Bündelung im oberen Frequenzbereich die Abstände zwischen den Treibern zu groß werden.

Im Hochtonbereich werden meist Druckkammer-Lautsprecher mit Hornaufsätzen verwendet. Sie sind ausreichend klein, um auch in diesem Frequenzbereich eine kolbenförmige Abstrahlung zu realisieren. Durch ihren höheren Wirkungsgrad liefern sie genügend Leistung zur Überbrückung größerer Entfernungen. Trotz aller Konstruktionsoptimierungen lässt sich die Bildung von Nebenkeulen nicht verhindern. Da sich diese meist schon im Bereich von 3 bis 5 kHz auftreten, verwendet man zur Korrektur so genannte "Waveformer" (siehe Abb. 1.21). Sie werden direkt auf die Druckkammerlautsprecher aufgesetzt und verbessern durch gezielte Umlenkung bzw. Reflektion die Schallabstrahlung. Diese relativ neue Erfindung wird manchmal auch als Waveguides bezeichnet. Für sie gibt es noch keine allgemeinen Standards, jedoch lässt sich ihre Arbeitsweise auf einige grundlegende Arten zusammenfassen. Ein Koerzitiv-Waveguides (z.B. von der Firma JBL) hat die Form eines langen Hornaufsatzes. In ihm wird der Schall vom Kompressionstreiber über viele Kanäle und kleine Schlitzte nach außen geleitet. Die lange Schallführung bewirkt eine Reduktion des Laufzeitunterschiedes.



Abb. 1.21 Arten von Waveformern
vgl. Holtmeyer, 2003, S. 4f

Soll das homogene Abstrahlverhalten auch bei den benachbarten Lautsprechern noch gewährleistet sein, darf die Phasendifferenz innerhalb eines Segmentes nicht größer als ein Viertel der jeweiligen Wellenlänge betragen. Diesem Prinzip angelehnt ist die Schallführung in Kanälen beim Model Hydra der Firma ElectroVoice. Die Laufzeitunterschiede werden mittels unterschiedlich langer Wege minimiert. An der Austrittsöffnung liegen alle Kanäle dicht nebeneinander in einer Reihe.

Der austretende Schall vermischt sich kohärent miteinander und bildet eine homogene Wellenfront. Das Unternehmen L-Acoustics hingegen verwendet DOSC-Waveguides. Sie erzeugen eine Laufzeitangleichung mithilfe eines speziellen Körpers. Seine Form ist so gewählt, dass der Abstand zwischen der runden Austrittsöffnung des Treibers und dem Ende des Waveformers immer gleich ist. An der Austrittsöffnung haben anschließend alle Frequenzen die gleiche Verzögerung. Eine völlig andere Herangehensweise verwendet die Firma NEXO. Mithilfe eines akustischen Parabolspiegels wird der Schall des Kompressionstreibers umgelenkt und die Phasen der Frequenzen angeglichen. Wie in der Optik entsteht durch die Reflektion eine reale und eine virtuelle Schallquelle. Basierend auf dieser Arbeitsweise wurden noch weitere Waveformer mit hyperbolischen oder elliptischen Reflektoren gebaut. Meist wird ihre genaue Konstruktion vom Hersteller nicht bekannt gegeben, da sie erheblich das Abstrahlverhalten beeinflussen und Kern des Line-Array-Systems sind. Eine Alternative dazu ist die Verwendung von Bändchenlautsprechern. Sie besitzen eine nahezu planare rechteckige Fläche zur Schallabstrahlung. Die daraus entstehende kolbenförmige Richtcharakteristik benötigt keine Korrektur durch Waveguides. Die Form der Membran begünstigt jedoch stark die Bildung von Partialschwingungen.

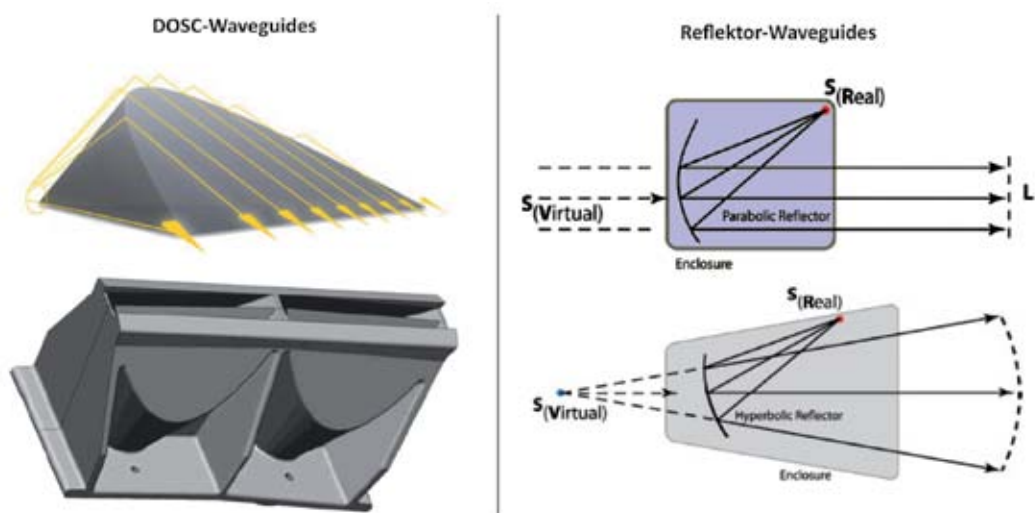


Abb. 1.22 Arten von Waveformern
vgl. Holtmeyer, 2003, S. 28f

Anstatt also einer einzelnen Fläche, werden sehr viele kleine Quellen verwendet, die in einer Reihe angeordnet sind. Dank neuartiger Neodym-Treiber werden dabei Durchmesser von 25mm realisiert. Der so entstehende Abstand von ca. 30mm gewährleistet ein kohärentes Schallfeld bis zu 10kHz²². Zur Bündelung wird den Treibern meist ein Horn vorgesetzt.

Um messtechnisch festzustellen, wie stark die Seitenkeulen sich aufgrund von Lücken bzw. Unterbrechungen in der Linienquelle auswirken, wurde der Abdeckungsgrad definiert. In der Praxis entstehen solche Lücken häufig durch das anwinkeln ("curven") der einzelnen Lautsprecher. Dabei beschallen die oberen und noch wenig geneigten Elemente für die hinteren Ränge und müssen dementsprechend größere Intensität abstrahlen. Der Neigungswinkel aller weiteren Quellen nimmt dann ständig zu, so dass die Untersten den Bereich in der Nähe des Line-Arrays versorgen. Über das separate Ansteuern der Lautsprecher wird somit die abgestrahlte Intensität angepasst und gegeben falls eine Phasenverschiebung durch gezielte Laufzeitverzögerung korrigiert. Da die Quellen sich im Schallfeld summieren, steigt auch die mögliche Reichweite mit steigender Anzahl von Quellen. Je stärker die Linienquelle gekrümmt ist, desto größer ist die Fläche, auf die sich der abgestrahlte Schall verteilt und desto geringer die Schallintensität beim einzelnen Hörer. Dieses Verfahren wird "Intensity Shading" genannt und gezielt zur Lautstärkeregelung genutzt. Die einzelnen Elemente können aber nur bis zu einem Maximum α_m angewinkelt werden, welches in Formel 1.11²³ ausgedrückt wird. Die Variable STEP beschreibt dabei den Abstand der einzelnen Segmente zueinander in Metern. Bei einem Line-Array mit 30cm hohen Elementen, darf jedes nur um maximal 10°²⁴ angewinkelt werden. Bei vier einzelnen Segmenten beträgt der gesamte Winkel somit maximal 30°.

$$\alpha_{\text{max}} = \frac{3^\circ}{\text{STEP}} \quad \text{Formel 1.11}$$

Die Konstruktion eines Line-Arrays für Basssysteme ist zwar theoretisch möglich, jedoch würden ihre Abmessungen so groß werden, dass sie in der Praxis kaum Anwendung finden. Dennoch wird der Tieftonbereich in der Unterhaltungsmusik immer wichtiger. Eine Richtwirkung ist demnach auch hier notwendig um einerseits Energie zu sparen und andererseits störende Effekte auszuschließen.

Meist werden deshalb mehrere Subwoofer mit einem Abstand von 2-4m zueinander in einer Linie vor oder unter der Bühne aufgestellt. Bis 150Hz²⁵ entsteht dadurch ein homogenes und sehr gerichtetes Schallfeld. Für alle tieferen Frequenzen agieren die Lautsprecher als einzelne Quellen mit einem Pegelabfall von 6dB pro Entfernungsverdopplung. Der rasche Energieverlust kann dann bei großen zu beschallenden Flächen nur mit einer Anhebung des Wiedergabepegels kompensiert werden, das jedoch ist für alle Personen in unmittelbarer Nähe der Quellen unangenehm.

22 vgl. Weinzierl, 2008, S. 450

23 vgl. Weinzierl, 2008, Formel 8.9

24 vgl. Weinzierl, 2008, S. 453

25 vgl. Weinzierl, 2008, S. 453

2. Testvorbereitungen

2.1 Das System TS56K von ME-Geithain

2.1.1 Aufgaben und Einsatzbereich

Das Einsatzgebiet des TS56k soll die Einspielung von natürlicher Musik in akustisch schwierigen Räumen sein. Um solche hohe Ziele zu erreichen, sind Quellen mit sehr geringen Verzerrungen notwendig, was große Anforderungen an oben genannten Kenndaten erfordert (siehe [Punkt 1.5.4](#)). Kriterien, wie homogenes Abstrahlverhalten auf der akustischen Achse bzw. nierenförmige Charakteristik selbst bei tiefen Frequenzen sind dabei ebenso wichtig wie ein lineares Übertragungsverhalten über die gesamte Distanz. Dabei sollte es sich aber auch um ein sehr effizientes und leicht zu transportierendes System handeln, welches darüber hinaus den hohen Standards der Firma entspricht.

2.1.2 Aufbau und Funktionsweise

Ein einzelnes Element ist in [Abb. 2.01](#) und [Abb. 2.02](#) zu sehen. Die hier verwendeten Daten basieren auf den im Prospekt enthaltenen Angaben (siehe [Abb. 4.02](#)) bzw. auf gemessenen Werten. Zur Freifeldmessung besitzt die Firma ME-Geithain einen reflektionsarmen Raum mit entsprechenden Messinstrumenten.



Abb. 2.01 Lautsprecher TS56K
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

Der TS56K besteht aus zwei 6,5Zoll Konuslautsprechern und acht 1-Zoll Kalottenlautsprechern. Die Tiefton-Konuslautsprecher realisieren dabei den unteren Übertragungsbereich (von 150Hz bis 2kHz) und sind 20cm voneinander entfernt. Sie liegen somit nah genug beieinander, damit eine homogene Abstrahlcharakteristik im unteren Frequenzbereich erreicht wird.

Die acht 1 Zoll-Kalottenlautsprecher sind in 60mm Abständen auf einer Ebene und coaxial vor den Konustreibern angebracht. Die Hochtöner befinden sich auf einer so genannten "Schallwand". Ihrer Breite ist auf die unterste nutzbare Frequenz, der so genannten Abkoppelfrequenz, der Hochtöner abgestimmt. Der tieffrequente Schall der dahinter angebrachten Lautsprecher wird von der Anordnung nicht negativ beeinflusst. Im Obertonbereich ist die Wellenlänge jedoch kleiner als die Breite der Schallwand und wird von dieser zurückgeworfen. Die Konstruktion ist darum auch als mechanische Frequenzweiche zu sehen, deren Trennfrequenz im Bereich der beiden Treibersysteme liegt.



Abb. 2.02 Lautsprecher TS56K (links: Rückansicht, rechts: Seitenansicht)
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

Die Hochtöner werden in Gruppen angesteuert. Da sie sich nicht in der gleichen Ebene wie die Tieftöner befinden, wurden die elektronischen Filter der Frequenzweiche so konstruiert, dass sie die notwendige Verzögerung liefern. Sie sind somit akustisch in einer Ebene, was Auslöschungseffekte aufgrund von Phasenverschiebungen verhindert.

Die Verwendung von Neodym-Magneten bringt eine deutliche Einsparung im Gewicht. Der damit verbundene geringere Aussteuerungsbereich wird genutzt, um den Treiber gezielt in die Sättigung zu fahren. Die entstehenden Effekte tragen positiv zum gesamt Klangbild bei, sind aber zu komplex, um sie hier zu beschreiben.

Jedes Element besitzt zwei Speakon NL4 Buchsen, um mehreren Segmente kaskadieren zu können. Durch spezielle Verbundelemente kann man sie zusammenhängen und in zweieinhalb Grad-Schritten auf bis zu fünfzehn Grad curven. Der angewinkelte hintere Teil der Seitenwände ermöglicht außerdem den Einsatz als Floor-Monitor. Durch entsprechende Zubehörteile lässt sich der TS56K wahlweise fliegen, auf einem Stativ oder an Wänden befestigen.



Abb. 2.03 Lautsprecher TS56K (links: Rückansicht, rechts: Seitenansicht)
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

2.1.3 Akustische Eigenschaften

Übertragungskurve

Die in Abb. 2.04 dargestellte Kurve (bei 0 Grad) zeigt deutlich die hohe Qualität des Lautsprechers. Zwischen dem angegebenen Übertragungsbereich bleibt sie innerhalb der Grenzen von 6dB und fällt unterhalb mit ca. 12dB/Oktave ab. Grund dafür sind aber nicht die Laufzeitglieder, sondern die zunehmende Richtwirkung der Lautsprecher mit steigender Frequenz. Durch den großen horizontalen Öffnungswinkel von 90 Grad fällt der Pegel bei seitlichen Messungen (5 bis 60 Grad) nur leicht ab. Erst die Messung bei 90 Grad zeigt einen starken Einbruch ab 900Hz. Es ist demnach möglich einen großen horizontalen Bereich gleichmäßig mit Schall zu versorgen, ohne jedoch den Raum rechts und links neben der Quelle sehr anzuregen. Diese Richtwirkung nimmt (wie oben beschrieben) bei größeren Winkeln im Obertonbereich noch zu und wird durch die Laufzeitglieder bis auf den unteren Frequenzbereich ausgedehnt.

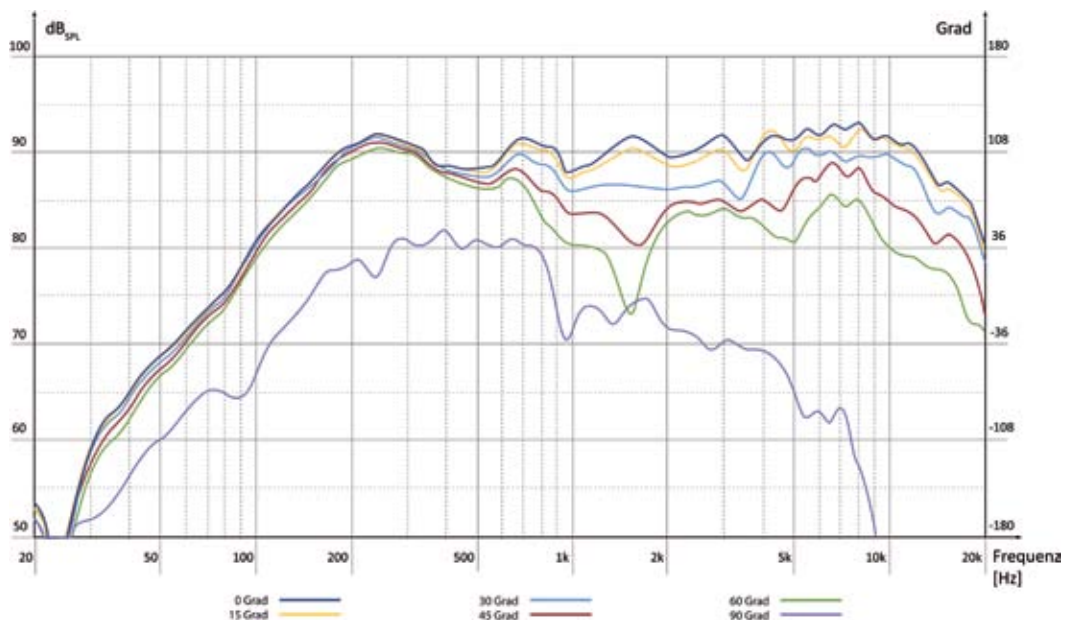


Abb. 2.04 Freifeld Übertragungsbereich
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

Richtcharakteristik

Wie oben schon erwähnt, ist die Nierencharakteristik eine der markanten Eigenschaften des Systems, welche maßgeblich durch speziell langfasrig gewebte Materialien am hinteren Teil des Lautsprechers erreicht wird. Er verzögert den rückwärtig ausgestrahlten Schall. Da hinter die Box auch Schall von der Vorderseite gelangt, vermischen sich beide Anteile und erzeugen in den Tiefen eine rückwärtige Dämpfung von 10dB. Ersichtlich wird dies im Polardiagramm in Abb. 2.05 zwischen 100 Hz und 500 Hz. Die nierenförmige Richtcharakteristik bleibt somit über den größten Teil des Übertragungsbereiches konstant. Zwar gab es in der Vergangenheit schon solche Versuche, jedoch scheiterten diese meist an der geringen Bandbreite des Verzögerungsgliedes.

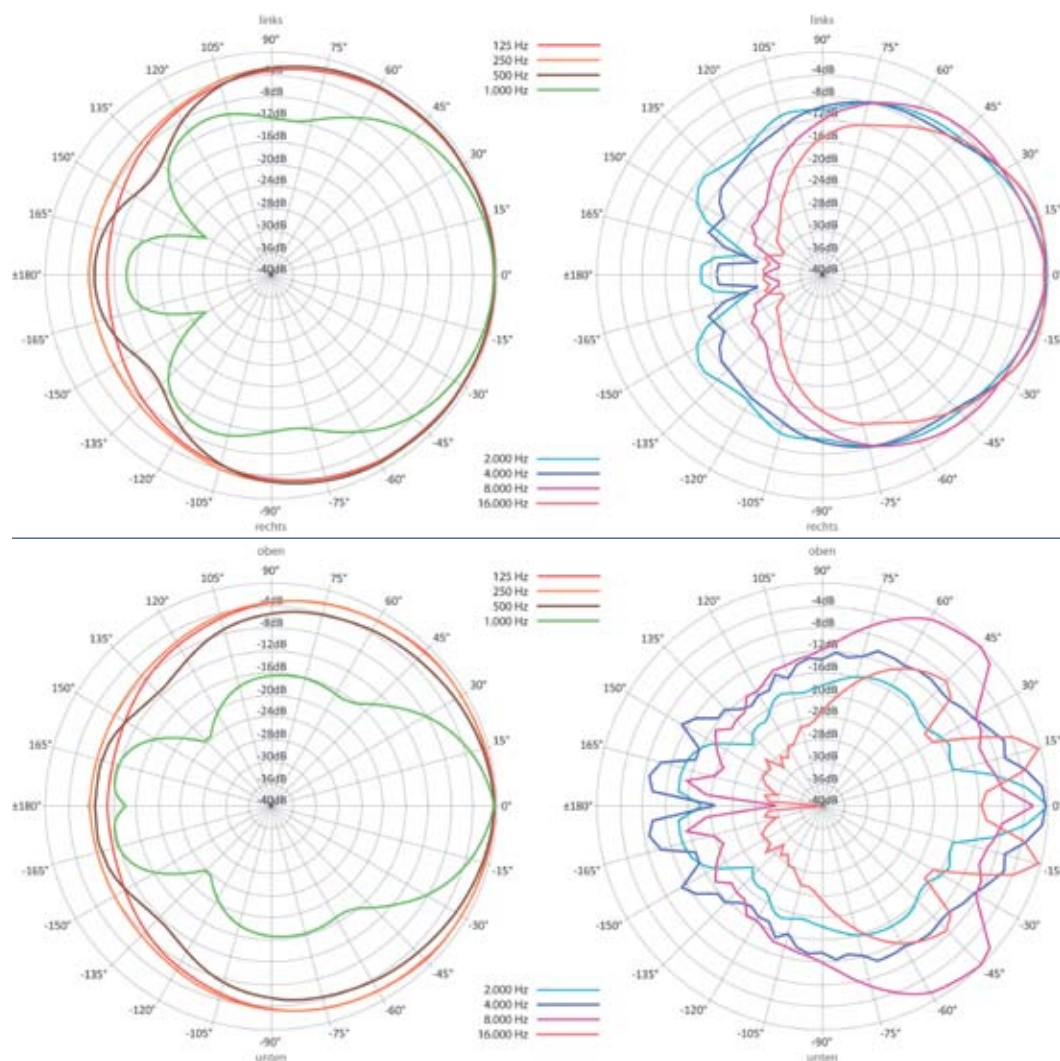


Abb. 2.05 Polardiagramm horizontales (oben) und vertikales (unten)
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

Bei steigender Frequenz erhöht sich auch die Richtwirkung der Treiber, was zu einem Zerfall der homogenen Abstrahlcharakteristik führt. In Abb. 2.06 wird dies in den Kurven oberhalb 1kHz ersichtlich. Beim TS56K sind die Hochtöner in 60mm-Abständen angebracht, was eine kolbenförmige Abstrahlung bis ca. 5kHz garantiert. Oberhalb davon kann der Schalldruckabfall durch elektronische Filter ausgeglichen werden, da Sprache und Musik in diesem Bereich generell eine geringere Schallleistung erzeugen. Die Homogenität der horizontalen Abstrahlung wird im entsprechenden Isobarendiagramm (siehe Abb. 2.06) oberhalb 1kHz besonders deutlich.

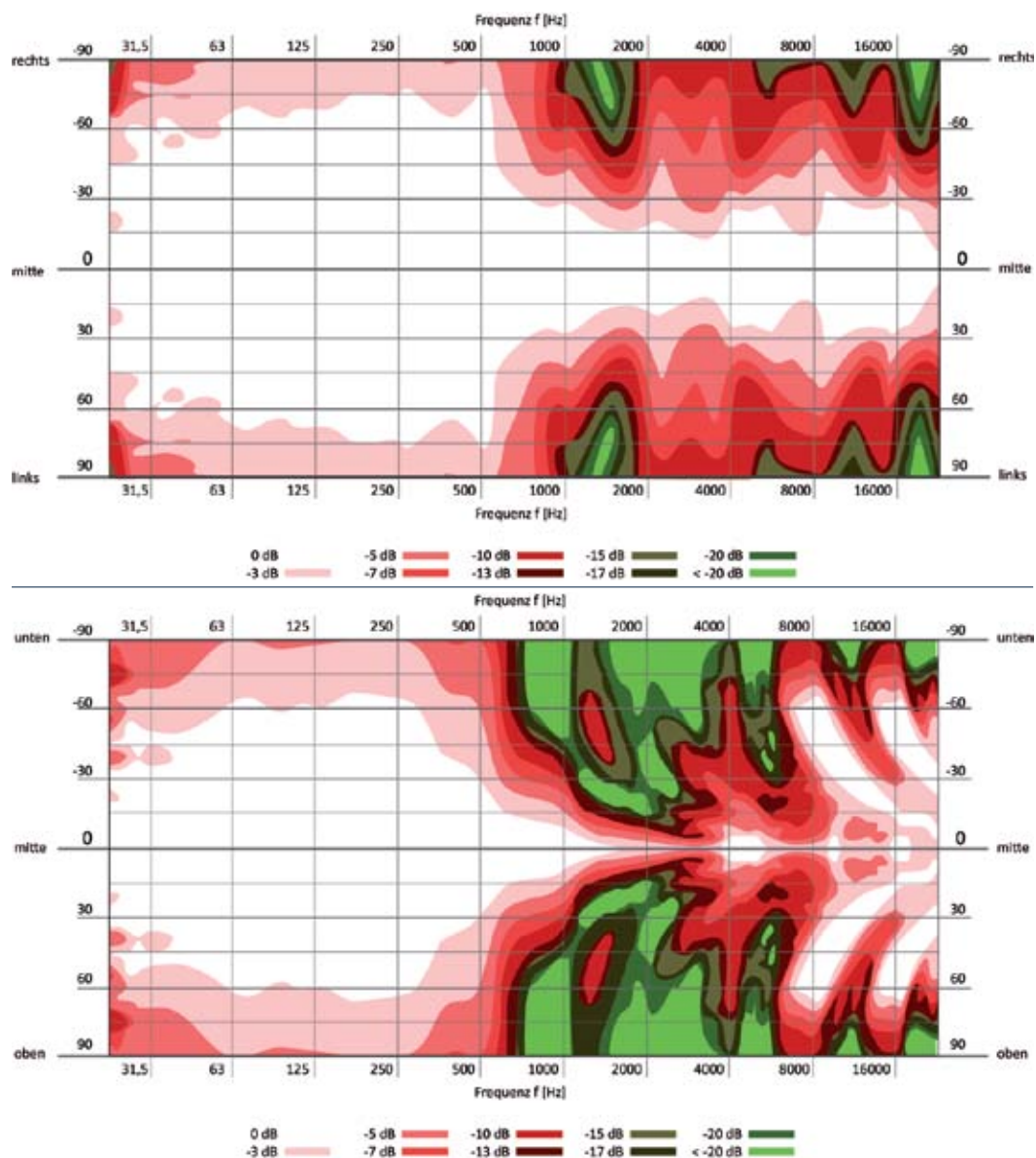


Abb. 2.06 Isobarendiagramm horizontal (oben) und vertikal (unten)
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

In vertikaler Ebene tritt zwischen 1 und 5kHz eine starke Bündelung auf. Bei Frequenzen darüber bilden sich zunehmende Nebenkeulen aus (im Polardiagramm bei 8 und 16kHz deutlich sichtbar). Bei Verwendung von mehreren Lautsprecherelementen verändert sich die vertikale Charakteristik des Arrays aufgrund von Interferenzerscheinungen zusätzlich. Da diese zu sehr komplexen Beziehungen führen, soll in dieser Arbeit nicht darauf eingegangen werden.

2.1.4 Unterschiede zu herkömmlichen Line-Arrays

Auswahl der Treiber

Um auch bei größeren Distanzen noch ausreichend Klangpräsenz zu gewährleisten, verwenden die meisten Line-Arrays Druckkammerlautsprecher mit Horntreibern. Diese verringern zwar den Pegelabfall im Hochtonbereich enorm, verursachen jedoch auch Verzerrungen im Klangbild. Grund dafür ist der hornförmige Trichteraufsatz. Er bündelt die abstrahlende Schallenergie und vergrößert dadurch die Reichweite des Lautsprechers. Da die Schallwellen an der Wand des Horns reflektiert werden und sich auslöschen bzw. addieren, entstehen Kammfiltereffekte, die sich als Verzerrung äußern. Innerhalb der zu beschallenden Fläche kommt es bei Hörnern außerdem zu Einbrüchen bzw. Überhöhungen bestimmter Frequenzen. Sie entstehen durch Auslöschungseffekte, die von den Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Quellen verursacht werden. Ein weiterer Grund dafür ist ihr Abstrahlverhalten, welches sich deutlich gegenüber anderen Treibern unterscheidet. Horngeladene Systeme erreichen erst nach einiger Entfernung ihre maximale Wirkung, wo hingegen zum Beispiel Konuslautsprecher den höchsten Pegel unmittelbar an der Membran erzeugen. Beide Treiber haben also in Bezug auf die Entfernung einen sehr unterschiedlichen Pegelverlauf, was zusätzlich für ein inhomogenes Schallfeld sorgt. Um diese negativen Effekte zu umgehen, wird beim TS56K darum grundsätzlich auf horngeladene Systeme verzichtet.

Waveformer

Line-Arrays von anderen Herstellern benötigen immer Waveformer oder ähnliche Elemente (siehe Abb. 1.21 und Abb. 1.22). Er bringt alle Frequenzen in Phase und erzeugt eine homogene Wellenfront. Seine Form bzw. Wirkungsweise ist sehr kompliziert und wird von den Herstellern nicht genau bekannt gegeben. Der Schall wird dabei durch speziell geformte Kanäle geleitet oder an Flächen reflektiert. Trotz des enormen Aufwandes zur Berechnung und Konstruktion dieser Elemente lässt es sich nicht vermeiden, dass durch Interferenzen unangenehme Klangverfärbungen entstehen (ähnlich denen bei Horntreibern - siehe "Auswahl der Treiber"). Diese werden vermieden, da die verwendeten Kalotten und Konustreiber keine Waveformer benötigen.

Bassniere

Wie schon im [Punkt 1.5.1](#) erläutert, sind gerichtete Quellen für einen guten Klang sowohl im Bühnen- als auch Zuhörerbereich wichtig. Zwar besitzen Lautsprecher von Grund auf eine gewisse Bündelung, jedoch verliert sich diese im unteren Frequenzbereich. Die Wellenlänge wird bei tiefen Frequenzen wesentlich größer als die abstrahlende Fläche (hier die Membran des Lautsprechers), was zu einem Verlust der Richtwirkung führt. Der Einfluss ist so groß, dass die Bündelung größtenteils verloren geht. Dank neuartiger Verzögerungsglieder von ME-Geithain (siehe [Punkt 2.1.3](#)) ist eine Bündelung auch in diesem Bereich möglich. Line-Arrays ohne diese Konstruktion besitzen somit nur im oberen Frequenzbereich die geforderte Bündelung, was zu schon beschriebenen Effekten (siehe [Punkt 1.5.1](#)) führt.

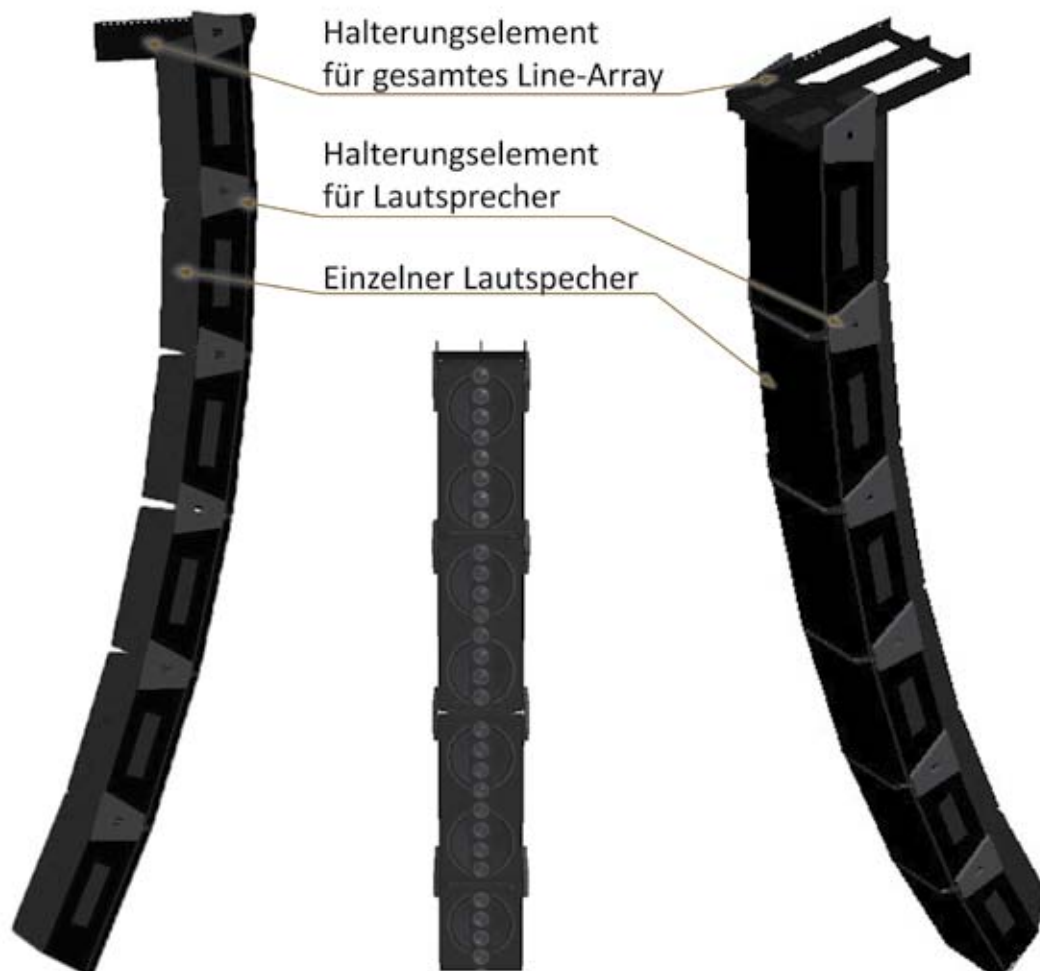


Abb. 2.07 TS56K als Line Array mit 6 Elementen und 5° Neigung pro Lautsprecher
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

Koaxiale Anordnung

Wie in Abb. 1.14 zu sehen sind die Treiber der TS56K coaxial angebracht. Es entsteht dadurch für den Hörer eine bessere Lokalisation (siehe Absatz "Koaxiallautsprecher") und es entstehen keine störenden Verzerrungen. Viele Line-Arrays verwenden die D'abolito-Anordnung. Dadurch lassen sich zwar alle Lautsprecher in einer Ebene anordnen, jedoch befinden sich dann nicht mehr alle Quellen auf einer akustischen Achse. Bei geringen Abständen verursacht dies ein unnatürliches Hörempfinden. Line-Arrays sind davon weniger betroffen, da der Abstand zwischen Publikum und Schallquelle wesentlich größer ist. Deutlich Wahrnehmbar ist dafür aber der oben beschriebene Kammfiltereffekt.

2.2 Bewertungsmethoden und Versuchsaufbau

2.2.1 Zielsetzung der Tests

Grundsätzlich verfolgen die Hörtest zwei Ziele. Primär soll erforscht werden, in welchem Maß bzw. welcher Qualität das Direktschallfeld besonders über größere Distanzen hinweg aufrechterhalten werden kann. Das sekundäre Ziel ist die Untersuchung von kugel- und nierenförmiger Richtcharakteristiken im Raum. Dabei konzentriert sich diese Arbeit auf subjektiv empfundene und zieht messtechnisch ermittelte Werte zum Vergleich heran.

2.2.2 Akustische Messungen und Methoden

Subjektive Messmethoden

Wie oben schon angedeutet, reicht die Ermittlung reiner Messwerte nicht aus. Eine subjektive Bewertung ist für tiefgründige Tests deshalb immer notwendig. Dies bedarf aber eines geschulten Gehöres bzw. einer Person, die großes Wissen über die akustischen und psychoakustischen Vorgänge besitzt. Im Vorfeld der Test wurden viele subjektive Messmethoden analysiert und auf ihre Tauglichkeit für diese Arbeit hin bewertet.

Der Sprachverständlichkeitstest ist in Ablauf sehr einfach (siehe "Subjektive Qualitätskriterien"). Er verbindet subjektives Empfinden mit objektiver Auswertung. Da jedoch entsprechend viele und geschulte Personen dafür benötigt werden, ist es nicht möglich ihn im Rahmen dieser Arbeit nutzen zu können. Eine statistische Ermittlung kommt demnach ebenfalls nicht in Frage, da für valide Ergebnisse eine noch größere Anzahl an Testpersonen mit geschulterem Gehör notwendig wäre.

Es wird sich darum im Folgenden auf die Aussagen des Personals von ME Geithain, sowie auf eigene Höreindrücke bezogen. Um den Versuchen eine objektive Grundlage zu geben, werden objektive Messmethoden verwendet.

Objektive Messmethoden

Als Basis der Bewertung dienen messtechnisch ermittelte Werte, die am Ort der Tests und im reflektionsarmen Raum der Firma ME Geithain gemessen wurde.

Die Grundlage aller Klanganalysen bildet das Frequenz-Pegel-Diagramm des Übertragungsbereiches. Am jeweiligen Messort wird diese sowohl in 10 und 20 Metern gemessen. Die Angabe des Freifeld-Übertragungsbereiches ermöglicht zudem noch eine Aussage über den Einfluss des Raumes.

2.2.3 Allgemeiner Versuchsaufbau

Die Quelle bei all diesen Versuchen ist entweder ein PC-Programm (Ascendo Room Tools 3.4) von einem Laptop, ein separater CD-Player (Sony X777ES) oder ein analoges Mikrofon. Da es sich um drei sehr unterschiedliche Signale handelt, werden sie zunächst einmal in einem Mischpult (Mackie 1402-VLZ Pro) zusammen geführt und angeglichen. Das Signal des Rechners muss zuvor in die analoge Form umgewandelt werden, was mithilfe einer externen Soundkarte (Edirol Audio Capture UA-5) geschieht.

Nach dem Angleichen bzw. Bündeln aller Quellen wird das Signal über den Main-Mix ausgegeben und gelangt über die Frequenzweiche (dBx Drive Rack 260) auf separate Verstärker. Dabei versorgt eine KME SPA 900F den Subwoofer. Alle anderen werden über drei weitere Endstufen (2x KME SPA 450S und 1x Mek SPA 450S) angesteuert. Jede Verstärker-Einheit speist dabei zwei Lautsprecher des Arrays. Ein Messmikrofon von Microtech Gefell nimmt den abgegebenen Schall auf und eine nachgeschaltete Verstärkerstufe passt Pegel bzw. Impedanz an. Alle nichtlinearen Verzerrungen der Messeinrichtung sind unterhalb der hier zulässigen Pegel. Sie beeinflussen das Messergebnis minimal, so dass sie in nachfolgenden Betrachtungen ignoriert werden können. Nachdem das Signal verstärkt und in seiner Impedanz angepasst wurde, gelangt es über die externe Soundkarte als digitales Signal wieder in den Laptop. Dort wird es vom Programm Ascendo Room Tools 3.4 mittels der FFT als Übertragungskurve dargestellt.

3. Testdurchführung

3.1 Mehrzweckhalle in Geithain

3.1.1 Raumeigenschaften

Allgemeine Angaben

Der erste Hörtest fand am 19. Februar 2009 in der Mehrzweckhalle in Geithain statt. Die Halle wird vorwiegend für sportliche Veranstaltungen genutzt, wodurch die entsprechende Funktionalität Vorrang vor akustischen Ansprüchen hat. Wie die meisten solcher Hallen besitzt sie ebene Wände, die rechtwinklig zueinander stehen.

Akustik und Beschallung

Der Fußboden ist zwar aus unterschiedlichem Material, doch immer glatt und schallhart. An drei Seiten wird das Spielfeld von einer 2 Meter hohen und 2cm dicken Filzwand begrenzt. Die Betonmauer darüber ist ohne Verkleidung. Die Wand auf der Eingangsseite ist auf gesamter Länge durch Zuschauerränge unterbrochen (2 Meter hoch und 3 Meter tief). Die Sitzbänke sind aus Holz und besitzen schmale Polsterbezüge.

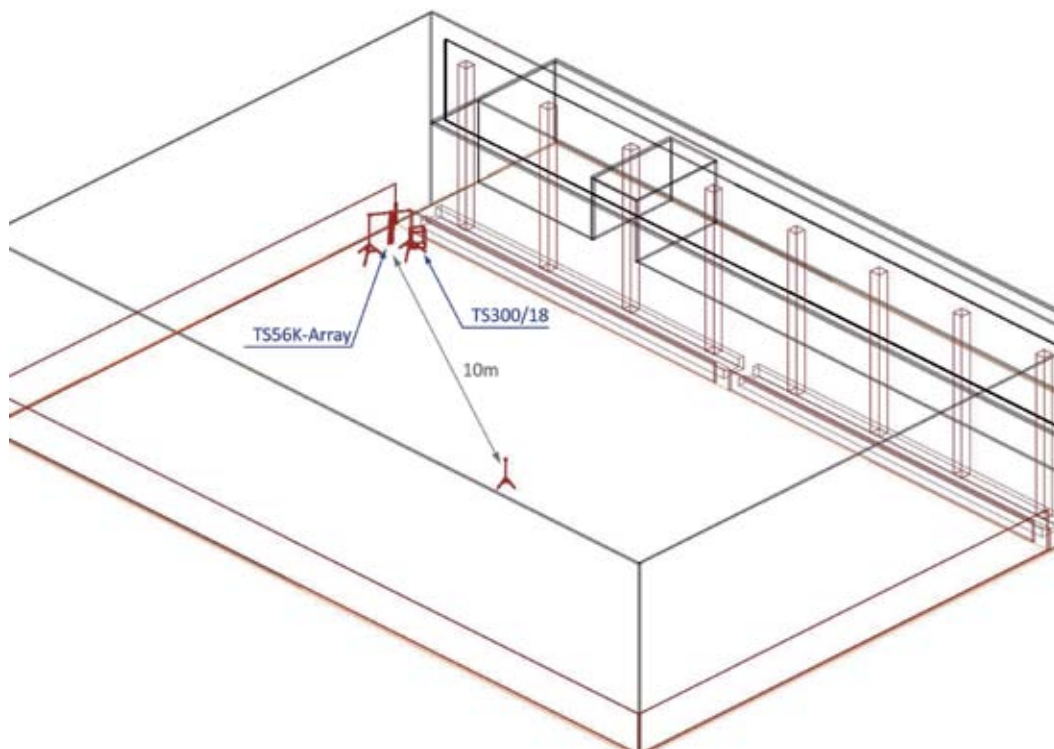


Abb. 3.01 Versuchsaufbau der Mehrzweckhalle Geithain (Skizze)
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH



Abb. 3.02 Versuchsaufbau der Mehrzweckhalle Geithain (Rendering)
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

Darüber befindet sich ein großes Fenster, welches plan zur umgebenden Wand ist. Zum Stützen der Decke wurden alle 4 Meter großflächige Holzbalken gesetzt und dazwischen Deckenstrahlplatten angebracht. Das Dach ist gänzlich aus Wellblech und ebenfalls ohne Verkleidung.

Im Allgemeinen sind neben der grundlegend schlechten Grundform der Halle, keine spezifischen Bauelemente zur Verbesserung der akustischen Raumeigenschaften vorhanden. Die Deckenbalken besitzen eine so große Fläche, dass sie deutlich hörbare Mehrfach-Echos entstehen lassen. Leider konnten aus zeitlichen und personellen Gründen keine Sprachtests durchgeführt werden. Jedoch auch ohne konkrete Werte lässt sich die Aussage treffen, dass dieser Raum eine sehr schlechte Akustik besitzt.

3.1.2 Versuchsaufbau

Es wird eine Schallzeile aufgebaut und auf der Diagonalen des Spielfeldes positioniert (siehe Abb. 3.01, Abb. 3.02, Abb. 4.03 und Abb. 4.04). Dadurch kann die maximale Länge der Halle ausgenutzt werden, was Messungen in 10, 20 bzw. 30 Metern Abstand ermöglicht.

Im ersten Durchlauf wurden vier Elemente mit jeweils 2,5 Grad Neigung zueinander getestet. Die akustische Achse des obersten Lautsprechers ist parallel zum Fußboden. Alle restlichen sind mit zunehmendem Winkel nach unten ausgerichtet, so dass der letzte um 7,5 Grad gekrümmt ist. Zwei Endstufen versorgen dabei immer zwei TS56k.

Ein weiterer Versuch ist mit 6 Lautsprechern durchgeführt worden. Die Winkel der Segmente, die Ausrichtung der Lautsprecher bzw. der akustischen Achse, sowie die paarweise Ansteuerung der Lautsprecher bleiben dabei unverändert. Der unterste TS56k besitzt gegenüber dem ersten einen Winkel von 12,5 Grad.

Das Messmikrofon wird in 10, 20 und 30 Metern Entfernung zum Array aufgestellt. An diesen Punkten wird dann in 1,20 Metern Abstand vom Boden (durchschnittliche Höhe des Ohres einer sitzenden Person) gemessen, um verschiedene Bereiche der Beschallungsfläche einzeln zu analysieren und den Abfall des Pegels über den gesamten Frequenzbereich zu erkennen.

3.1.3 Versuchsablauf

Messung des Übertragungsverlaufes

Bei der Erfassung der messbaren Werte wird ein Sweep im Messprogramm generiert, gewandelt, verstärkt und über die Lautsprecher in den Raum abgegeben. Ein genau ausgerichtetes Messmikrofon nimmt den Schall auf. Es gelangt nach Verstärkung, Pegelanpassung und Digitalisierung wieder in das Messprogramm. Dort wird es über eine FFT als Übertragungsverlauf mit kontinuierlichem Frequenzband sichtbar. Bereich und Sweep sind der menschlichen Wahrnehmung angepasst und reichen von 20 Hz bis 20kHz.

Hörtest

Zunächst werden Musikstücke von einer CD wiedergegeben und in ihrer Charakteristik bewertet. Die Titel wurden speziell für die Tests ausgewählt und sind in ihrem Klang bekannt. Sie enthalten keinen künstlich hinzugefügten Hall, damit dieser den Raumeindruck nicht verfälscht. Abweichungen bzw. Verzerrungen sind dadurch ebenfalls gut wahrnehmbar. Die Aufnahmen sind speziell für solche Testzwecke von der Firma Denon durchgeführt worden und enthalten kaum Nachhall.

Sprachtest

Da über Lautsprecher nicht nur Musik, sondern auch Sprache wiedergegeben wird und diese in den verschiedensten Bereichen deutliche Unterschiede zu musikalischen Stücken besitzt, soll darauf separat eingegangen werden. Zum Testen der Lautsprecher bei einer durchschnittlichen Beschallungssituation spricht eine Person in ein Handmikrofon und das erzeugte Signal wird ebenfalls über das Line-Array wiedergegeben. Um dabei auch Ergebnisse zu erhalten, mit denen man die einzelnen Hallen vergleichen kann, führt man noch zusätzliche Hörtests mit aufgezeichneter Sprache durch. Die Aufnahme wurde von Herrn Thomala (ehemaliger Leiter der Tonabteilung des Gewandhauses Leipzig) gerade für solche Versuchssituationen eingesprochen.

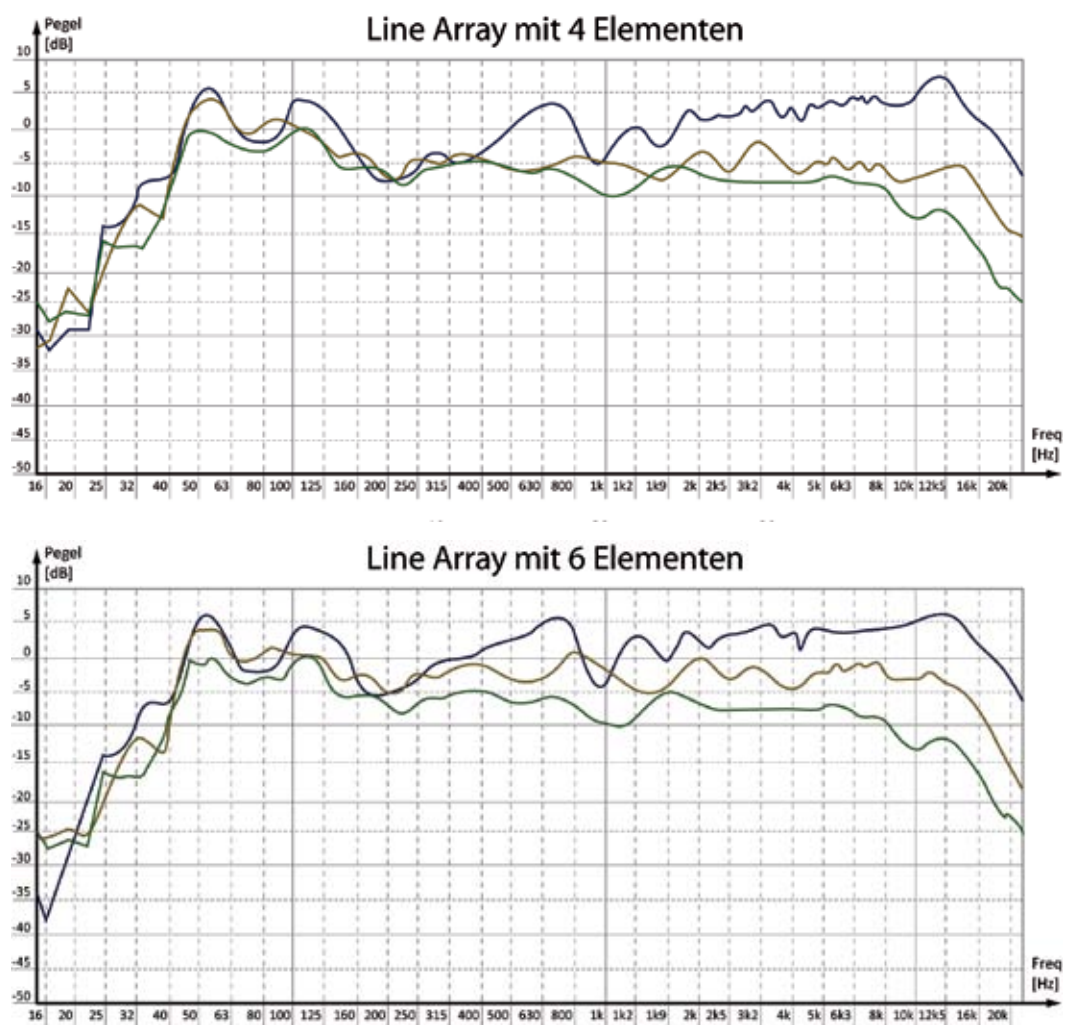


Abb. 3.03 Übertragungsverlauf Mehrzweckhalle Geithain
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

3.1.4 Versuchsergebnisse

Messung des Übertragungsverlaufes

Wie in den Kurven in [Abb. 3.03](#) zu sehen ist, weisen alle sechs Kurven starke Unregelmäßigkeiten auf. Lediglich in einem kleinen Abschnitt zwischen 2 und 8 kHz kann man annähernd einen konstanten Verlauf erahnen. Im unteren Frequenzbereich hingegen ist die Abweichung so stark, dass sich die Kurven teilweise sogar überschneiden. Vergleicht man die zwei Darstellungen miteinander wird ersichtlich, dass die Kurven bei 10 und 30 Meter nahezu gleich sind. Lediglich bei 20 Metern sind Unterschiede zu erkennen. Bei 1kHz hat sie eine starke Anhebung wo hingegen die beiden anderen Graphen Einbrüche ausweisen. Grund sind Raumresonanzen die von den parallelen Wänden und der ungünstigen Deckenkonstruktion hervorgerufen werden. Sie erzeugen eine ungleichmäßige Verteilung der Raummoden. Dadurch diese Ortsfest sind treten je nach Position des Mikrofones andere Überhöhungen bzw. Absenkungen in der Messkurve auf. Darüber hinaus findet, über den gesamten Bereich gesehen, kein einheitlicher Pegelabfall statt. Das gleichmäßige Absinken von 6dB pro Entfernungsverdopplung ist somit laut Diagramm nicht erreicht worden.

Hörtest

Trotz der schlechten akustischen Messwerte des Raumes ist eine erstaunlich hohe Wiedergabequalität vorhanden. Dies beruht vor allem auf der Tatsache, dass der diffuse Schallanteil gegenüber dem Direkten wesentlich geringer ist. Er tritt somit durch Verdeckungseffekte für die subjektive Wahrnehmung nicht so stark in den Vordergrund wie es die Messkurven vermuten lassen.

Der große horizontale Abstrahlwinkel von 90° ermöglicht eine ausreichende und nahezu gleichmäßige Versorgung der Hallenfläche mit nur einem Array (Zuschauerränge ausgenommen).

Sprachtest

Aufgrund des oben erwähnten großen Direktschallanteils ist auch bei Sprachwiedergabe eine sehr hohe Silbenverständlichkeit vorhanden. Die Mehrfach-Echos treten dabei besonders deutlich hervor, werden aber subjektiv nicht als störend empfunden.

3.2 Großer Saal im Gewandhaus Leipzig - Line Array geflogen

3.2.1 Raumeigenschaften

Allgemeine Angaben

Der Saal besitzt ca. 1.900 Zuschauer-Plätze und maximal 300 Plätze für den Chor. Ungefähr im Zentrum des Saales befindet das Podium mit ca. 180m² Fläche. Es wurde speziell für musikalische Veranstaltungen geplant und besitzt deshalb keine parallelen Wände und kaum rechte Winkel. Alle größeren Flächen wurden mit Diffusoren versehen, so dass nur wenige planare Wände vorhanden sind.

Die Bestuhlung ist in mehrere Ebenen bzw. Ränge eingeteilt. Aufgrund der hohen Zahl an Sitzplätzen hat der Zuschauerraum große horizontale aber auch vertikale Ausdehnung. Da sich das Podium relativ mittig befindet, befinden sich Sitzplätze an allen Seiten. Für ein genaueres Bild sind zwei Panoramabilder des Saales auf der Website des Gewandhauses zu finden ([Bühnen-Panorama](#) und [Emporen-Panorama](#)). Hinter den Sitzplätzen für den Chor befindet sich eine große Schuke-Orgel.

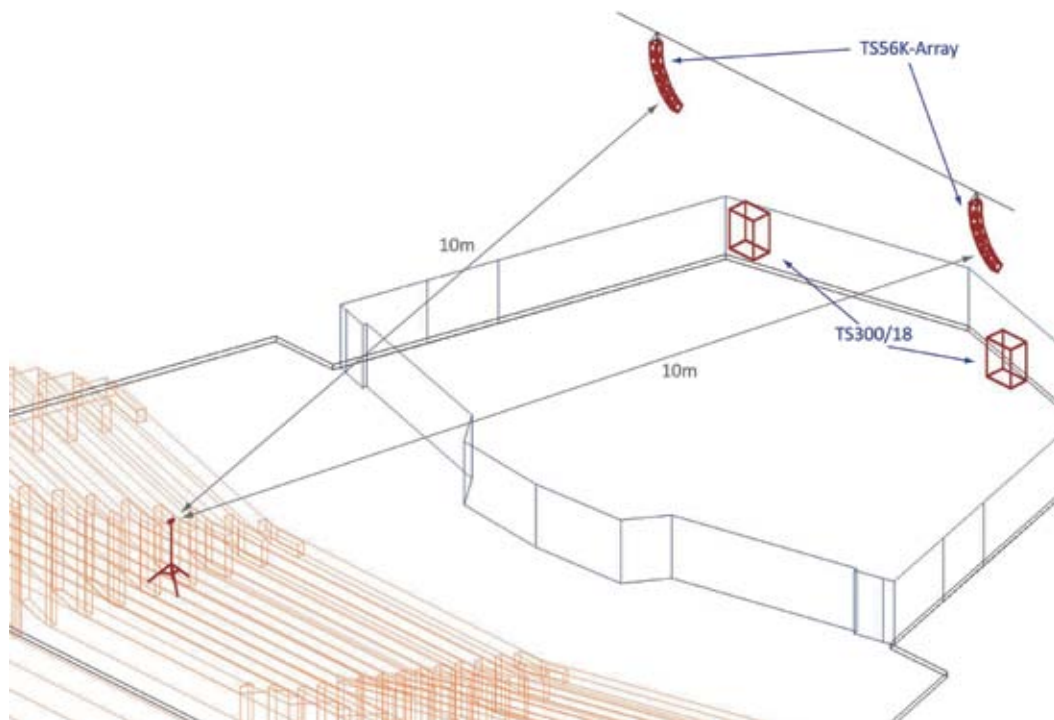


Abb. 3.04 Versuchsaufbau Großer Saal - Line-Array geflogen (Skizze)
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

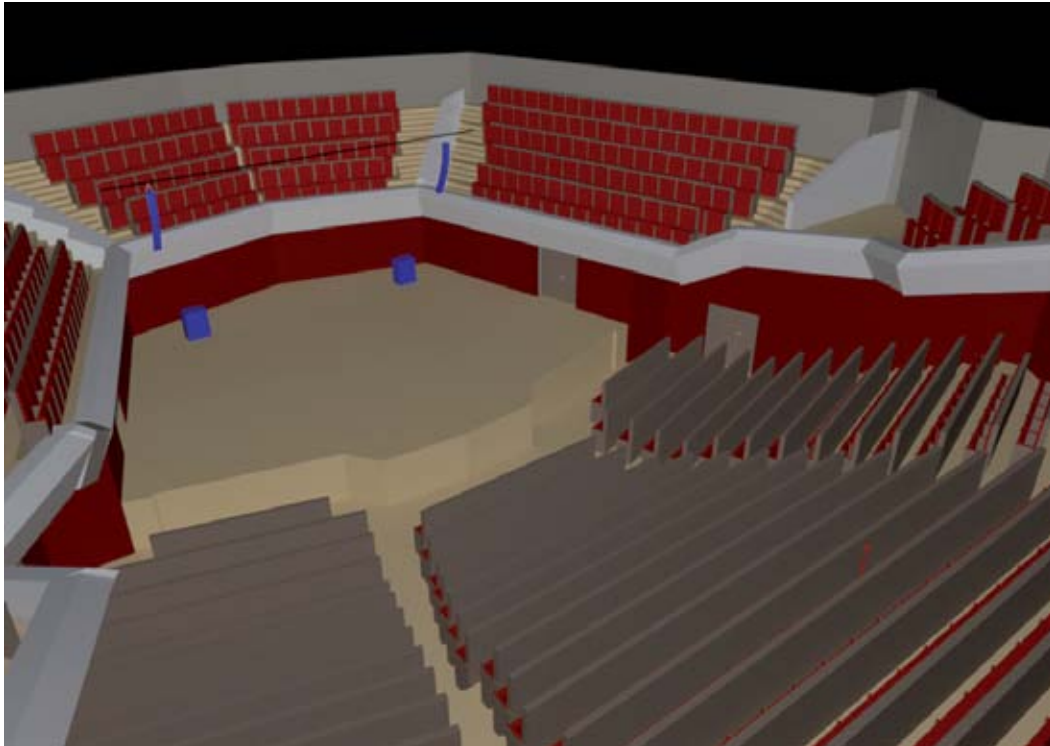


Abb. 3.05 Versuchsaufbau Großer Saal - Line-Array geflogen (Rendering)
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

Akustik und Beschallung

Die Akustik des Raumes wird in einschlägiger Literatur, bzw. Kritiken als sehr gut bewertet. Aufgrund der hohen Anzahl an Diffusoren und Absorbern wurde eine mittlere Nachhallzeit von 2s erreicht. Detaillierte Tests fanden im Rahmen dieser Versuche nicht statt, da hier auf bereits vorhandenes Material verwiesen werden kann.

Die große Anzahl an Sitzplätzen benötigt dementsprechend viel Platz. Die Polsterung wurde so gewählt, dass sie dem Absorptionsvermögen eines durchschnittlichen Menschen ähnelt. Dadurch ergeben sich weniger Differenzen bei unterschiedlicher Zuschauerzahl. Hinzu kommt noch die besondere Anordnung der Plätze, welche nicht (wie in einfachen Hallen) auf einer Ebene angeordnet sind. Durch diese Staffelung wird garantiert, dass alle Zuhörer direkte Sicht (und somit auch guten Hör-)Kontakt zur Bühne haben. Der Nebeneffekt dabei ist jedoch, dass eine sehr große Ausdehnung im vertikalen Bereich entsteht. Vereinfacht lässt sich somit sagen, dass mit zunehmender Höhe auch der Abstand der Sitzplätze zur Bühne zunimmt. Eine einheitliche Beschallungsebene benötigt somit immer mehrere Lautsprecher, um auf diese großen Entfernungsdifferenzen gezielt einzuwirken.

3.2.2 Versuchsaufbau

Da im Rahmen dieses Tests auch eine Hörprobe für weitere Personen inbegriffen ist, weicht der Ablauf bzw. Aufbau des Hörtests etwas von der oben festgelegten Weise ab (siehe Abb. 3.04, Abb. 4.05 und Abb. 4.06). Zur besseren Präsentation des Line-Arrays werden zwei Array-Zeilen aufgebaut, die dem Hörer ein Stereobild liefern. Dabei ist jede aus sechs TS56K zusammengesetzt, die sich 3 m vor dem Bühnenrand in einer Höhe von 4,5 m (Unterkannte Array) befinden. Insgesamt sind somit 48 Hochtöner und 12 Tief-Mittel-Ton-Lautsprecher, sowie noch zwei separate 18 Zoll Subwoofer im Einsatz. Jede Box besitzt eine Neigung der akustischen Achse von 5 Grad gegenüber der darüber befindlichen. Die Neigung reicht somit von 0 Grad (oberster Lautsprecher) bis 30 Grad (unterster Lautsprecher). Abweichend zum allgemeinen Versuchsaufbau ist die Verwendung eines weiteren Mikrofons (KEM 970²⁶ von Microtech Gefell). Es soll für intensive Tests für Sprachwiedergabe genutzt werden.

3.2.3 Versuchsablauf

Messung des Übertragungsverlaufes

Der Sweep wird wieder im Abstand von 10 und 20 Metern gemessen. Da es sich diesmal jedoch um eine stereophone Beschallung handelt, muss an mehreren äquidistanten Punkten gemessen werden. Als Bezugslinie wurde die akustische Achse des entsprechenden mittleren Segmentes verwendet. Da die Zuhörer in den Rängen ausschließlich sitzen reicht es aus, dass Mikrophon in 1,20 Metern Höhe zu platzieren.

Hörtest

Aufgrund der großen vertikalen Ausdehnung war schon im Vorherein geplant, den Test nur auf die unteren Reihen (Parkett und Empore) zu begrenzen. Somit werden alle folgenden Angaben sich nur auf diesen Bereich beziehen. Um Hörproben auch auf den oberen Reihen durchführen zu können braucht es jedoch mehr Lautsprecher. Außerdem müsste man, entsprechend der Geometrie des Saales, den Winkel der einzelnen Lautsprecher anpassen.

Sprachtest

Wie auch schon in der Mehrzweckhalle Geithain werden auch Hörtests mit Sprache durchgeführt. Der Ablauf ist analog zu obigem, jedoch fanden darüber hinaus noch Tests mit dem Kondensator-Ebenen Mikrophon von Microtech Gefell statt. Der Empfänger wurde an der Brüstung der Chor-Empore in einem Abstand von ca. 100cm zum Sprecher (Herr Thomala - ehemaliger Tonmeister des Gewandhauses) aufgestellt (siehe Abb. 4.06). Neben der Wiedergabe von natürlichen Sprecherstimmen wurden, wie auch in den anderen Tests, Tonaufzeichnung von Sprache verwendet.

26 Microtech Gefell, KEM970, Erstellungsjahr 2000, <http://www.microtechgefell.de/home.htm>, Datum des Aufrufs 15.04.2010

3.2.4 Versuchsergebnisse

Messung des Übertragungsverlaufes

Wie Abb. 3.06 zeigt ist auch hier die Pegelabnahme von 6dB über den gesamten Frequenzbereich nahezu konstant vorhanden. Dies entspricht somit einer natürlichen Schallquelle. Der leichte Einbruch bei 150 Hz zeigt den Übergang vom Subwoofer zum Topteil auf. Der steile Pegelabfall unterhalb 35 Hz verhindert die Erzeugung sehr tiefer Frequenzen. Außer für bestimmte Anwendungsgebiete (z.B. Diskothek, Kino) sind sie für Beschallungen nicht relevant. Sie würden dem Klang mehr Störungen als Nutzinformation hinzufügen.

Hörtests

Die Wiedergabe der Musikstücke beweist eine Pegelfestigkeit des System von 114 dB (in 10m Entfernung gemessen). Die Pegel der Verzerrungen sind selbst bei einer solchen Lautstärke an der unteren Schwelle der menschlichen Wahrnehmung. Durch die Dämpfung von 10dB an der Rückseite des Lautsprechers wurden Frequenzen zwischen 100 und 500Hz sehr stark gedämpft. Selbst bei hohen Pegeln bleibt diese Dämpfung konstant, wodurch eine hohe Deutlichkeit auch bei großer Wiedergabelautstärke vorhanden ist. Die hohe Abstrahlbreite von 90 Grad gewährleistet eine großflächige Abdeckung der zu beschallenden Fläche und eine sehr variable Aufstellung der Quellen. Es kann dadurch auch auf den Center Lautsprecher verzichtet werden. Bei horngeladenen System wäre dies nicht möglich, da sie im Durchschnitt kleinere Abstrahlwinkel besitzen.

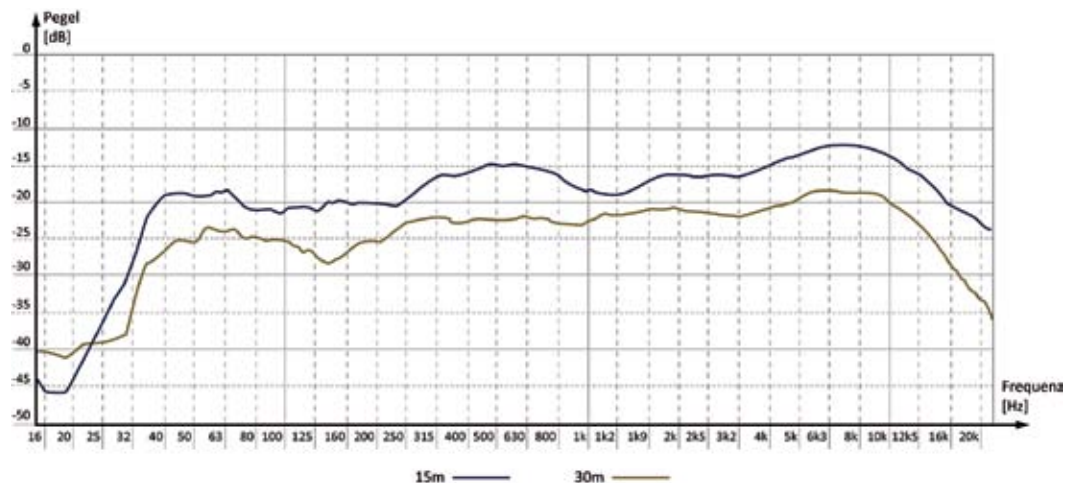


Abb. 3.06 Übertragungsverlauf Großer Saal - Line-Array geflogen
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

Sprachtests

Die Wiedergabe der Aufzeichnung, sowie der natürlichen Sprache ergab eine sehr hohe Silbenverständlichkeit, die selbst im hintersten Teil des Saales noch vorherrschte. Zudem war die Klangfarbenneutralität ausgezeichnet, was sich auf die fehlenden Hornsysteme zurückführen lässt. In Zusammenhang mit dem geringen Anteil an Reflektionen erzeugen diese Faktoren an vielen Stellen des Saales eine sehr hohe Wiedergabequalität bzw. Verständlichkeit. Darüber hinaus besitzt das System eine große Ortsunabhängigkeit bzw. Rückkopplungssicherheit.

3.3 Großer Saal im Gewandhaus Leipzig - Line-Array auf der Bühne

3.3.1 Raumeigenschaften

Die Abschnitte "allgemeine Angaben", sowie "Akustik und Beschallung" sind analog zu denen im [Punkt 3.2.1](#) und werden hier nicht noch einmal aufgeführt.

Der große Saal des Leipziger Gewandhauses wird überwiegend für klassische Konzerte genutzt. Die Raumakustik ist deshalb darauf ausgerichtet den natürlichen Klang von Instrumenten (die sich auf der Bühne befinden) so zu reflektieren bzw. absorbieren, dass er den Zuhörerraum in bestmöglicher Qualität erreicht.

3.3.2 Versuchsaufbau

Die Positionierung der Lautsprecher soll diesen Effekt gezielt für eine bessere Wiedergabesituation ausnutzen (siehe [Abb. 3.07](#), [Abb. 4.07](#) und [Abb. 4.08](#)). Die sonst als Flugrahmen verwendete Halterung wird als Fuß genutzt. Der unterste Lautsprecher wird auf diesem mit 95 Grad Neigung montiert. Die weiteren 5 Segmente bauen mit einem jeweiligen Winkel von 5 Grad darauf auf. Insgesamt ist das Array somit um 30 Grad angewinkelt. Die 6 Lautsprecher werden dabei in 2er Gruppen von jeweils einer Verstärkerstufe angesteuert.

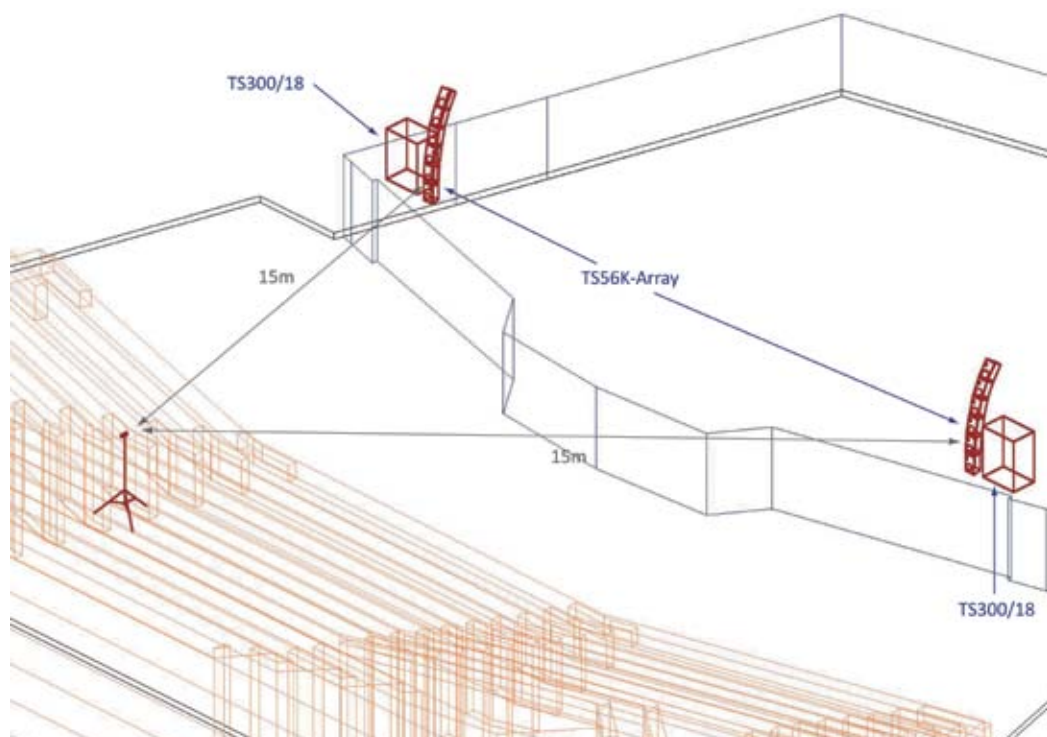


Abb. 3.07 Versuchsaufbau Großer Saal - Line-Array auf der Bühne (Skizze)
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

Das gesamte Line-Array sitzt auf einem Rollwagen jeweils links und rechts an der Bühnenvorderkante. Zur besseren Basswiedergabe dienen zwei T300/18 Subwoofer.

Neben jedem TS56k-Stack befindet sich noch ein Stativ mit insgesamt vier TS58-Lautsprechern. Diese Prototypen sind speziell für Sprachwiedergabe konstruiert. Die Tests, dieser Lautsprecher sind jedoch nicht Teil dieser Dokumentation und dem entsprechend hier nicht erfasst.

Der restliche Versuchsaufbau ist analog zum [Punkt 3.2.1](#). Jedoch birgt die Aufstellung gegenüber diesem die Gefahr zusätzlicher Reflektionen, da die begrenzenden Wände deutlich näher an den Schallquellen liegen als bei der geflogenen Variante.



Abb. 3.08 Versuchsaufbau Großer Saal - Line-Array auf der Bühne (Rendering)
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

3.3.3 Versuchsablauf

Messung des Übertragungsverlaufes

Die äquidistanten Abstände des Messmikrofones zu den Lautsprechern betragen hier 15 und 30 Metern. Die Höhe, so wie alle weiteren Angaben entsprechen denen aus Punkt 3.2.3.

Hörtest

Auch bei diesem Test konzentriert sich die Analyse auf die unteren Reihen des Saales (also Parkett und Empore). Weichen im Folgenden bestimmte Angaben davon ab ist dies speziell Vermerkt.

Sprachtest

Die Tests zur Sprachverständlichkeit wurde hier, ähnlich wie im Punkt 3.1.3, mit dem oben beschriebenen kabelgebundenen bzw. Funkmikrofon durchgeführt. Auch die vorher erwähnten Sprachaufzeichnungen wurden hier wieder verwendet.

3.3.4 Versuchsergebnisse

Messung des Übertragungsverlaufes

Laut dem Diagramm im Abb. 3.09 ist deutlich die Pegelabnahme von 6dB pro Entfernungsverdopplung über den gesamten Frequenzbereich zu erkennen. Wie oben schon erwähnt entspricht dies einer natürlichen Schallquelle.

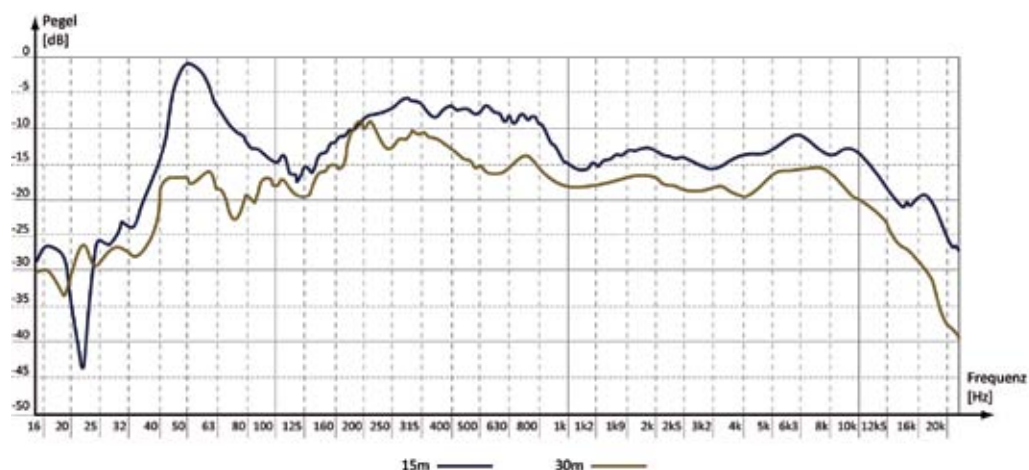


Abb. 3.09 Übertragungsverlauf Großer Saal - Line-Array auf der Bühne
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

Hörtests

Da die Pegelfestigkeit unabhängig vom Wiedergabeort innerhalb des Saales ist, wird hier auf den entsprechenden Abschnitt in [Punkt 3.2.4](#) verwiesen. Die im [Punkt 3.3.2](#) befürchteten Reflektionen waren nicht vorhanden. Vielmehr unterstützten sie das Klangbild im Zuschauerraum auf positive Weise. Die Dämpfung von 10dB im Bereich von 100 bis 500Hz verhindert darüber hinaus basslastige Reflektionen, was einen klaren und deutlichen Klang hervorruft.

Da die Position der Lautsprecher nahe dem Orchester ist treten kaum Lokalisationsstörungen auf, wie es beim geflogenen Line-Array der Fall wäre. Trotz der Abstrahlbreite von 90° ist der Abstand zum Zuhörer-Raum zu gering um den gesamten Bereich ausreichen versorgen zu können. Es ist somit empfehlenswert noch einige Stützlautsprecher in der Mitte der Bühnenvorderkante aufzustellen.

Sprachtests

Auch die Sprachverständlichkeit war wie schon im vorhergehenden Test hervorragend. Sie übertraf diese sogar noch, da sie die Reichweite bis zu den hintersten Reihen des Saales ausgedehnte. Auch die oben schon erwähnte Ortsunabhängigkeit bzw. Rückkopplungssicherheit war hier vorhanden.

4. Fazit

Diese Arbeit hatte zum Ziel, das neue Line-Array-System von Musikelektronik Geithain in seinen Einzelheiten zu beschreiben und es auf die Klangqualität in verschiedenen Räumen zu prüfen. Dazu wurde es auf besondere Fakten bzw. Komponenten untersucht und anschließend mit herkömmlichen Typen verglichen (Absatz 2 "Testvorbereitungen"). Zur Erklärung der verwendeten Terminologie sind vorher im Absatz 1 "Grundlagen" alle notwendigen Parameter angeführt. Diese bezogen sich auch auf Absatz 3 "Testdurchführung", der alle relevanten Daten über die durchgeführten Hörtest behandelte. In verschiedenen Räumen sind dazu ein bzw. zwei Line-Array-Systeme aufgebaut worden. Nach Korrektur des Frequenzganges wurde der Übertragungsverlauf in 10 und 20 Metern Entfernung ermittelt. Anschließend abgespielte spezielle Musikstücke bzw. Sprachtests gaben Aufschluss über die Klangqualität und Verständlichkeit der Lautsprecher im Raum.

Fazit - Mehrzweckhalle Geithain

Durch die Nierenförmige Abstrahlung sowie den über die Fläche konstant bleibenden Übertragungsbereich wird eine hohe Klangqualität gewährt. Der hohe Direktschallpegel verdeckt bei kontinuierlichem Signal sogar den übernatürlich großen Diffusschall bzw. die vielen Echos der Mehrzweckhalle.

Fazit - Gewandhaus Line Array geflogen

Anhand aller subjekt- und objektiven Parameter aus Abb. 3.03 lässt sich feststellen, dass die gleichmäßige Pegelabnahme in Verbindung mit der geringen Anregung des Raumes bzw. dem Diffusschall ein sehr gutes Klangbild erzeugt. Um jedoch auch die hintere Empore mit genug Direktschall zu versorgen sind noch 2 zusätzliche Lautsprecher pro Seite notwendig

Fazit - Gewandhaus Line Array auf Bühne

Analog zum obigen Bemerkungen ist auch in diesem Versuch die Pegelabnahme mit 6dB pro Entfernungsverdopplung bei allen Frequenzen nahezu identisch (siehe Abb. 2.12). Der geringere Abstand zum Orchester wirkte sich außerdem positiver auf die Lokalisation aus. Verbessert wird die Klangqualität zusätzlich durch die sekundäre Raumstruktur, da sie speziell für Schallquellen im Bühnenbereich konstruiert wurde. Es bestand keine Abhängigkeit zu den fest definierten Hängepunkten des Saales. Die Lautsprecher konnten somit näher am Publikum platziert werden, was auch die zu beschallende Fläche in Richtung des Zuhörerraumes verschob. Zusammen mit der hohen Qualität der Quelle ergaben diese Faktoren ein sehr gutes Klangbild (auch in den hinteren Sitzreihen). Der Direktschallpegel war wesentlich größer als der des diffusen Schalls. Störende Effekte, wie Echos, inhomogener Nachhall, etc. traten aufgrund der guten Raumakustik nicht auf.

Zusammenfassung

Es sollte, ähnlich einer natürlichen Schallquelle, ein gleichmäßiger Pegelabfall von 6dB innerhalb des gesamten Übertragungsbereiches vorhanden sein. Wie in Abb. 3.03, Abb. 3.06 und Abb. 3.09 zu sehen ist dieses Ziel erreicht worden. Trotz der sehr unterschiedlichen Raumakustik überwiegte im gesamten Beschallungsbereich (Abstand max. 20 bzw. 30 Meter vom Lautsprecher) deutlich der Direktschallanteil. Sowohl Sprache, als auch die abgespielten Musikstücke besaßen dadurch ein hohes Maß an Klarheit bzw. Verständlichkeit. Trotzdem war das Klangbild ausgewogen und wurde nicht als höhenlastig empfunden. Das System war bei allen Versuchen einfach zu platzieren und benötigte nur minimale Korrekturen.

Eingrenzung

Zwar wurde das Line Array in verschiedenen Positionen mit hochwertigem Equipment und korrekten Methoden vermessen, für valide Aussagen reicht dies jedoch nicht aus. Dazu müssten Untersuchungen in weiteren Räumen durchgeführt werden. Auch wären zusätzliche Versuchsmethoden (wie z.B. ein Sprachverständlichkeitstest) mit speziell geschulten Personen notwendig. Doch selbst eine große Menge an Tests lässt noch keine allgemeine Aussage zu. Wie oben schon erwähnt besteht eine sehr komplexe Wechselwirkung zwischen Quelle, Raum und Senke, die Verallgemeinerungen nur begrenzt zulässt. Eine verlässliche und genaue Aussage über das Zusammenwirken bzw. das Klangbild des Line-Arrays in einem Raum liefert nur ein praktischer Test. Dies sollte auch durch ausreichend geschultes Personal erfolgen, da die einfache Handhabung des Systems allein noch keinen guten Klang garantiert. Hochwertige Komponenten erleichtern die Arbeit bzw. verringern den Aufwand. Jedoch erst der richtige Einsatz des Equipments durch gutes Personal, lässt eine Veranstaltung gelingen.

Literaturverzeichnis

1.1 Bücher

- 1.1 Borucki, Hans: Einführung in die Akustik, 3. Auflage, Mannheim 1989
- 1.2 Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudioteknik, Band 1, 6. Auflage, München 1997
- 1.3 Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudioteknik, Band 2, 6. Auflage, München 1997
- 1.4 Dickreiter, Michael: Mikrofon-Aufnahmetechnik, 2. Auflage, Leipzig 1995
- 1.5 Möser, Michael: technische Akustik, 6. Auflage, Berlin 2005
- 1.6 Veit, Ivar: technische Akustik, 4. Auflage, Würzburg 1988
- 1.7 Weinzierl, Stefan: Handbuch der Audiotechnik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008

1.2 Hochschulschriften

- 2.1 Gedeon, Panagiotis, Lautsprecher und deren Eigenschaften, Ferienakademie 2004 Universität Stuttgart, <http://www.ipe.uni-stuttgart.de/content/web4/vortraege/Lautsprecher.pdf>, Datum des Aufrufs 20.8.2010
- 2.2 Grohs, Philipp, gefensterte Fouriertransformation, TU Wien - Institute of Discrete Mathematics and Geometry 2009, <http://www.dmg.tuwien.ac.at/grohs/lva/gabor.pdf>, Datum des Aufrufs 10.10.2010
- 2.3 Holtmeyer, Volker Dipl.-Ing., IFBICON, Mysterium Line-Array - Mode oder Trend?, CAVIS 5.03.2003, http://www.ifbicon.de/publication/documents/d_CAVIS-2003_VH_Mysterium%20Line-Array.pdf, Datum des Abrufs 6.08.2010
- 2.4 Huber, Claus: Diplomarbeit - Angewandte Raumakustik am Beispiel eines Probenraumes, http://iwk.mdw.ac.at/Forschung/pdf_dateien/2004d_Claus-Huber_Raumakustik_DA.pdf, Wien, 2004
- 2.5 Jungebluth, Christian: Facharbeit - Raumakustik in Regieräumen, SAE Köln - AEDP 0302, 8.7.2003

1.3 Vorlesungsmaterial

- 3.1 Dost, Gerd: Audiomesstechnik
- 3.2 Hösel, Michael: Akustik- und Studioteknik

1.4 Internet

- 4.1 Fair-Audio, Hifi-Lexikon, <http://www.fairaudio.de/hifi-lexikon-begriffe/konuslautsprecher-kalottenlautsprecher.html>, Datum des Aufrufs 12.06.2009
- 4.2 iFabrik GmbH, Gewandhaus Leipzig - Großer Saal, Erstellungsjahr 2007, http://www.gewandhaus.de/gwh.site,postext,panorama-ansichten,artikel_id,312.html?PHPSESSID=30v893l4klq4012a0p6ur9rmt3, Datum des Aufrufs 19. April 2009
- 4.3 KLING & FREITAG GmbH, K&F E 90 MK II, Erstellungsjahr 2009, <http://www.klingfreitag.biz/101.0.html>, Datum des Aufrufs 9.08.2010
- 4.4 MEYER SOUND GmbH, M'elodie, Erstellungsjahr 2010, <http://www.meyersound.de/products/mseries/melodie/>, Datum des Aufrufs 7.08.2010
- 4.5 Microtech Gefell, KEM970, Erstellungsjahr 2000, <http://www.microtechgefell.de/home.htm>, Datum des Aufrufs 15.04.2010
- 4.6 Rufus64, Klarheitsmaß, Erstellungsdatum 18. Januar 2008, <http://de.wikipedia.org/wiki/Klarheitsma%C3%9F>, Datum des Aufrufs 25.11.2008
- 4.7 Sengpiel-Audio, Kurven gleicher Lautstärke, Erstellungsjahr 2003, <http://www.sengpielaudio.com/Acoustics226-2003.pdf>, Datum des Abrufs 18. Mai 2009
- 4.8 Wikipedia, Gabor-Funktion, Erstellungsdatum 9.10.2010, <http://de.wikipedia.org/wiki/Gabor-Transformation>, Datum des Aufrufs am 10.10.2010
- 4.9 Wikipedia, Kammfiltereffekt, Erstellungsdatum 29.06.2010, <http://de.wikipedia.org/wiki/Kammfiltereffekt>, Datum des Aufrufs am 10.10.2010
- 4.10 Wikipedia, Schalldruck, Erstellungsdatum 18.08.2010, <http://de.wikipedia.org/wiki/Schalldruck>, Datum des Aufrufs 20.08.2010

Anhang

Anlagenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	78
Glossar.....	79
Abbildungen.....	82
Abb. 4.02 Technische Daten des TS56k	82
Abb. 4.03 Mehrzweckhalle Geithain - Überblick	83
Abb. 4.04 Mehrzweckhalle- Line Array	83
Abb. 4.05 Gewandhaus Leipzig- Großer Saal	84
Abb. 4.06 Sprachtest mit Herrn Thomala	84
Abb. 4.07 Gewandhaus Leipzig- Line-Array auf der Bühne	85
Abb. 4.08 Gewandhaus Leipzig- Line-Array auf der Bühne	85

Abkürzungsverzeichnis

A	Fläche (in m^2)
c	Schallgeschwindigkeit (in m/s)
EN	europäische Norm
f	Frequenz (in Hz)
F	Kraft (in N)
h	räumliche Ausdehnung (in cm)
ISO	International Organisation for Standardisation
J	Schallintensität (in W/m^2)
L	Schalldruckpegel (in dB)
p	Schalldruck (in Pa)
P	Leistung (in W)
r	Radius (in cm)
r_H	Hallradius (in cm)
r_H	effektiver Hallradius (in cm)
RT_x	Nachhallzeit (x in ms)
S	Gesamtoberfläche eines Raumes (in m^2)
SPL	Sound Pressure Level (Schalldruckpegel)
STEP	???
t	Zeit (in ms)
T	Nachhallzeit (in ms)
v	Schallschnelle (in m/s)
w	Schallenergiedichte (in $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)
λ	Wellenlänge (in cm)
η	Wirkungsgrad (in %)
γ	Bündelungsgrad
α_m	mittlerer Absorptionsgrad

Glossar

1 Druckkammerlautsprecher

Dieser Lautsprecher gehört zur Kategorie der Kompressionstreiber. Direkt vor dem Hornaufsatz befindet sich eine sogenannte Druckkammer. Mithilfe dieser Konstruktion soll der Strahlungswiderstand erhöht und zusammen mit dem Horn den Wirkungsgrad verbessern. Der Schall durchläuft sofort nach Erzeugung an der Membran einen Aufsatz mit vielen Kanälen. Diese sind so gestaltet, dass nach Austreten die Wellen in Phase gebracht worden sind. Die Austrittsöffnung der darauf folgenden Kammer muss im Durchmesser kleiner sein als die der Membran, was den höheren Strahlungswiderstand erzeugt. Die gewonnene Effektivität geht aber zu Lasten der Klangqualität. Beispielsweise kann der Phase-Plug die Phasen der einzelnen Frequenzen nicht vollständig angleichen. Auch treten häufig stehende Wellen in der Druckkammer auf und die hohen Strömungen an der Austrittsöffnung verursachen breitbandige Störgeräusche.

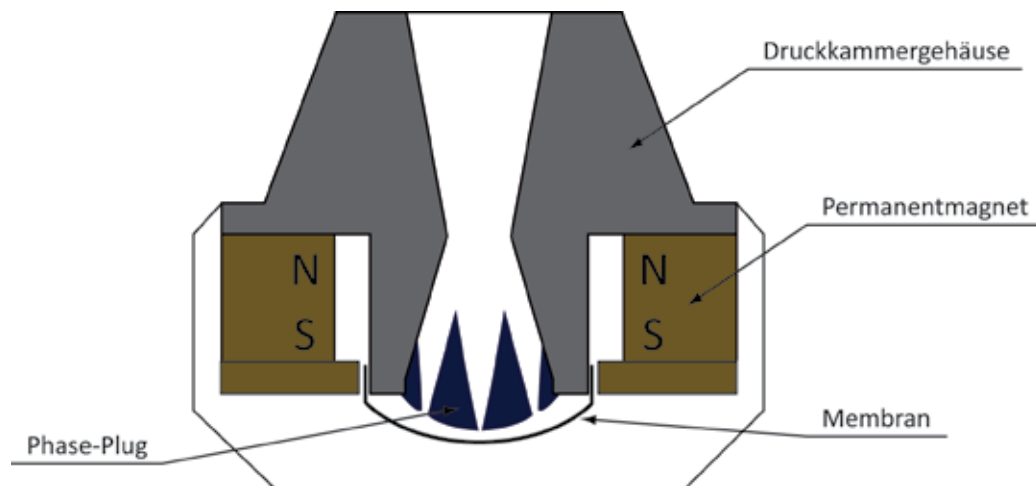


Abb. 4.01 Versuchsaufbau Großer Saal - Line-Array auf der Bühne (Skizze)
vgl. Daten von Musikelectronic Geithain GmbH

2 Impuls, Sprung und Dirac-Stoß

Ein Impuls bezeichnet in dieser Arbeit ein besonderes Messsignal, dass durch einen hohen und kurzen Energiestoß charakterisiert wird. Er wird zur Charakterisierung von elektrischen Systemen verwendet. Seine Besonderheit ist der gänzlich lineare Frequenzgang innerhalb eines bestimmten Bereiches. Wird es durch das Testsystem geleitet verändert sich der Impuls aufgrund der verwendeten Bauteile. Mithilfe der Fouriertransformation kann am Ausgang das Signal umgewandelt werden. Das erhaltene Diagramm beschreibt den Frequenzgang des getesteten Objektes.

In der Akustik wird ein Impuls in den Raum gesendet und an anderer Stelle mit Mikrofon wieder aufgenommen werden. Durch die Fouriertransformation kann auch hier wieder der Frequenzgang des Systems (hier der Nachhall des Raumes) ermittelt werden. Zudem liefert es Informationen über die Stärke und zeitliche Zusammensetzung von Early Reflections und Nachhall.

3 gefensterter Fouriertransformation

Die Fouriertransformation (auch Gabor-Transformation genannt) ermöglicht es das Frequenzspektrum aus einem zeitlichen Signal zu berechnen. Es ist möglich ein bestimmtes Intervall analysieren, jedoch werden in diesem keine zeitlichen Veränderungen erfasst. Die Fouriertransformation ist also nur für stationäre Signale wirklich aussagefähig. Phänomene innerhalb des festgelegten Bereiches werden somit nicht erkennbar. Um veränderliches Material untersuchen zu können muss es somit in kleine Intervalle aufgeteilt werden. Probleme ergeben sich hier aber aus der Art der Ausschnitte, auch Fenster genannt. Die Enden eines abrupt abgeschnittenen Signales verfälschen das Ergebnis, weshalb man zur Fensterung häufig die Gaußsche Funktion benutzt. Ihre Grenzen besitzen einen gleitenden über ohne sprunghafte Änderungen.

Laut der Heisenbergschen Unschärferelation¹ schließt sich eine genaue Zeit- und Frequenzlokalisierung gegenseitig aus. Außerdem werden Phänomene innerhalb eines Intervalls aufgrund der nicht erkennbar. Ferner ist zu beachten, dass die Gesetzmäßigkeiten des Schallstrahlenmodells erst oberhalb der vierfachen Schröderfrequenz Gültigkeit besitzen. Unterhalb dieser wird Schall als normale Welle beschrieben.

4 Kammfiltereffekt

Dieser Begriff beschreibt eine besondere Art der Schwingungs-Überlagerung. Wird ein Audiosignal in seiner Phase um 180 Grad gedreht und mit sich selbst (ohne Phasendrehung) vermischt löschen sich beide vollständig aus. Verringert sich nun die Verzögerung wird das Signal wieder hörbar, jedoch bleiben Einbrüche bzw. Überhöhungen ständig erhalten. In der Praxis treten sie häufig bei mehrkanaligen Musikaufnahmen auf. Der unterschiedliche Abstand der Empfänger zur Quelle ruft geringfügige Zeitverschiebungen zwischen den einzelnen Signalen auf. Werden diese vor dem zusammenführen nicht korrigiert entstehen Kammfiltereffekte. In Räumen können sie durch Raumreflektionen entstehen, die den Klang an bestimmten Hörpositionen Verfärben können. Für ein ungeschultes Gehör wird er jedoch erst bemerkbar, wenn man den Phasenunterschied variiert. In diesem Fall verschieben sich auch die herausgefilterten bzw. verstärkten Frequenzen.

¹ vgl. Grohs, 2009, S. 16

5 Messmikrofon

Ein Messmikrofon ist ein Kondensatormikrofon, was zur Ermittlung von Messdaten verwendet wird. Es ist als Druckgradient ausgeführt und besitzt einen sehr linearen Übertragungsbereich, sowie niedrige Verzerrungswerte. Zur Sicherstellung des hohen Standards sind eigene Normen (z.B. IEC 61094 & 61672²) definiert worden.

6 Schröderfrequenz

Die Schröderfrequenz bezeichnet den Punkt, ab dem die Raummoden so dicht liegen, dass man von einem Kontinuum spricht. Oberhalb dieser breiten sich im Idealfall alle Reflektionen im Raum gleichmäßig aus. Diese Diffusität verhindert eine diskrete Beschreibung, weshalb nur unter der Schröderfrequenz eine genaue Analyse des Raumes möglich ist. Hier ist das Ziel die einzelnen Raummoden gleichmäßig zu verteilen.

$$f_{(Schroeder)} \approx 2000 \sqrt{\frac{T_N}{V}}$$

Formel 6.01

2 vgl. Weinzierl, 2008, S. 344

Abbildungen

Abb. 4.02 Technische Daten des TS56k

Prinzip	2-Wege-Passiv-Koaxial-Beschallungssystem mit Nierencharakteristik im Bassbereich
Übertragungsbereich	100 Hz ... 20 kHz - 6 dB
Kennempfindlichkeit	95 dB
Abstrahlwinkel (h x v)	90° x 12° f > 2 kHz
Bassrichtcharakteristik	Kardioide > 10 dB
Maximaler Schalldruckpegel	124 dB / r = 1 m (peak)
Nennbelastbarkeit	240 W
Höchstbelastbarkeit	300 W
Impedanz	8 Ohm
Trennfrequenz	2,2 kHz
Bündelungsmaß	im Bereich von 100 Hz ... 10 kHz
Anschlusselemente	2x Speakon NL 4 (Slave)
Lautsprecherbestückung	Tiefton 2x 6,5 Zoll Konus Hochton 8x 1 Zoll Kalotte
Überlastschuttschaltung	Selbstrückstellend
Abmessungen (B x H x T)	210 x 425 x 250 mm
Gewicht	12 kg
Gehäuseausführung	Mehrfach verleimtes Hartholz Seitenhalterung für Arraysystem kratzfester Strukturlack Schwarz RAL 9005 Grau RAL 7035 Sonderfarben auf Kundenwunsch
Zubehör	Halteelemente für Array-System, Sicherungsösen bei geflogenem Betrieb, Wand-, Decken- und Stativelemente

Abb. 4.03 Mehrzweckhalle Geithain - Überblick



Abb. 4.04 Mehrzweckhalle- Line Array



Abb. 4.05 Gewandhaus Leipzig- Großer Saal



Abb. 4.06 Sprachtest mit Herrn Thomala



Abb. 4.07 Gewandhaus Leipzig- Line-Array auf der Bühne

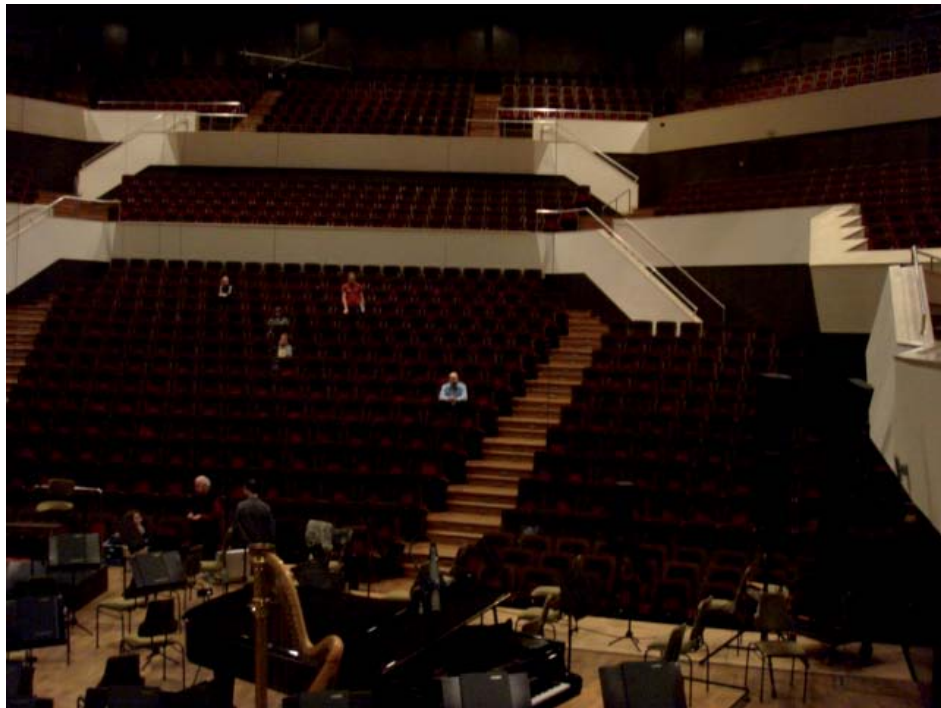


Abb. 4.08 Gewandhaus Leipzig- Line-Array auf der Bühne



Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Teile, die wörtlich oder sinngemäß einer Veröffentlichung entstammen, sind als solche kenntlich gemacht.

Unterschrift Andreas Frei

Die Arbeit wurde noch nicht veröffentlicht oder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.